Der Einfluß des elektrischen Feldes auf Transformatoren- und Schalteröl.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

MARTIN HAMEL
aus Halle (Saale).

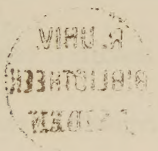
HALLE (SAALE)
Buchdruckerei Heinrich John
1927.

Referent: Professor Dr. Karl Schmidt.

Korreferent: Professor Dr. G. Hertz.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Dem Andenken meiner Mutter.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544303_0039

Inhalt.

Seite

I. Einleitung 7

II. Die Versuche und Versuchsergebnisse 9

A. Ultramikroskopische Untersuchungen.

a) Die Methode und die Versuchsanordnung . . 9

b) Die Versuchsergebnisse 11

1. Betrachtung der Submikronen in verschieden behandelten Oelproben V_1 . . . 11

2. Trockenes Oel

Bewegung der Teilchen durch Aufladung V_2 bis V_5 11

Bewegung der Teilchen durch Polarisation V_6 bis V_7 13

Bewegungserscheinungen beim Umpolen V_8 bis V_{11} 14

3. Wasserhaltiges Oel

Bewegung durch Aufladen und Polarisation und die Erscheinungen beim Umpolen V_{12} bis V_{18} 16

Die Zersetzung einzelner Wasserteilchen V_{19} und V_{20} 18

B. Sonstige Untersuchungen.

1. Die Zersetzung des Wassers V_{21} bis V_{24} . . 19

2. Die Zersetzung des Oeles selbst V_{25} 22

3. Feste Verunreinigungen V_{26} 23

III. Betrachtungen über die Durchschlagsfestigkeit von Isolieröl 25

1. Das Durchschlagsgesetz für wasserhaltiges Oel . 25

2. Die Zersetzung des Oeles 29

3. Feste Verunreinigungen 31
4. Das Zusammenwirken von zersetzbaren Beimengungen, der Zersetzung des Oeles und festen Verunreinigungen 33
IV. Erklärung von Versuchsergebnissen verschiedener durch die im Abschnitt III angestellten Betrachtungen über den Durchschlag von Isolieröl 35
V. Ausblick auf die praktische Bedeutung der vorstehenden Versuche und die daraus entwickelten theoretischen Vorstellungen gemäß Abschnitt III . 43
1. Schalterexplosionen 43
2. Zersetzung des Oeles 43
3. Schlammbildung 45
4. Reinigung 46
5. Prüfung 47
VI. Zusammenfassung der Ergebnisse 49
VII. Literaturübersicht 53
VIII. Anhang.

I. Einleitung.

Die dielektrische Festigkeit von Isolierölen, die sich durch sorgfältige Experimente an kleinen Mengen erreichen läßt, ist bekanntlich viel größer als diejenige, die in den Apparaten im Betriebe herrscht. Es ist nicht richtig, schlechthin von der Dielektrizitätskonstante eines Isolieröles zu sprechen; denn diese wird mitbestimmt durch Beimengungen der verschiedensten Art. Stern[1]) spricht sogar die Vermutung aus, daß die verschiedenen Oelsorten in ihrer Durchschlagsfestigkeit sich nur wenig von einander unterscheiden würden, wenn es gelänge, sie ausreichend zu reinigen. Die zahlreichen Untersuchungen, die an sehr gut gereinigten Oelen angestellt wurden, führen dazu, einen Teil von fremden Stoffen als zur Konstitution des Oeles gehörend zu betrachten. Diese Anschauung läßt es zu, eine Durchschlagsfestigkeit zu definieren, der der Grad einer Verunreinigung = Null zuzusprechen ist. Liegt der Durchschlagswert unterhalb dieses Nullpunktes, so wird die Herabsetzung einer ihrer Stärke entsprechenden Verunreinigung zugeschrieben. Liegt er oberhalb, so ist er bedingt durch die Güte des Oeles selbst. Der Nullpunkt muß also so gewählt sein, daß unterhalb die Herkunft des Oeles keinen Einfluß mehr ausübt, während oberhalb Verunreinigungen zu vernachlässigen sind. In Anlehnung an die Untersuchungen von Friese[2]) könnte in diesem Sinne etwa die Durchschlagsfestigkeit von 200 KV/cm als Nullpunkt festgelegt werden. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beziehen sich ihrer erheblichen praktischen Bedeutung wegen zum größten Teil auf Oel, dem ein Ver-

---

[1]) Eletrotechn. Zeitschr. 1922, S. 140.

[2]) Wissenschaftl. Veröff. a. d. Siemens-Konzern 1921, 1. Band, 2. Heft, S. 41.

unreinigungsgrad zukommt, der größer ist, als der eingeführte Nullwert.

In der zitierten Arbeit des verstorbenen Herrn Professor Friese sind eine Reihe von Versuchsergebnissen enthalten, die bisher ungeklärt blieben und zum Teil in der Literatur zu unbefriedigten Annahmen (Seite 41) geführt haben. Mein hochverehrter Lehrer, Herr Professor Schmidt, wies als Freund des Herrn Professor Friese in seinem Nachruf[3]) auf den Wert dieser Isolieröluntersuchungen hin und gab mir die Anregung, und durch seine stets freundliche Unterstützung und Beratung die Möglichkeit, die noch offenen Fragen weiter zu verfolgen.

Von den experimentellen Feststellungen, die nach Friese in der Literatur bekannt wurden, sind die von Draeger[4]) und Sorge[5]) hervorzuheben. Die vorliegende Arbeit nimmt die Versuchsergebnisse der genannten Autoren als gegeben an und bedarf daher zu ihrer Erklärung wesentlich anderer Methoden, als sie den bisherigen Isolieröluntersuchungen zu Grunde liegen.

Ich darf an dieser Stelle nicht versäumen, Herrn Professor Vorländer-Halle (Saale) und Herrn Professor Siedentopf-Jena für ihre freundliche Unterstützung bei ultramikroskopischen Untersuchungen meinen ergebensten Dank auszusprechen.

[3]) Wissenschaftl. Veröff. a. d. Siemens-Konzern 1925, Bd. 2.
[4]) Archiv f. Elektrotechnik 1924, Bd. 13, S. 366.
[5]) Archiv f. Elektrotechnik 1924, Bd. 13, S. 189.

II. Die Versuche und Versuchsergebnisse.

A. Ultramikroskopische Untersuchungen.

a) Die Methode und die Versuchsordnung.

Die Herstellung des Tyndallkegels unter dem Mikroskop erfolgte auf die von Zsigmondy und Siedentopf angegebene Weise. Als Lichtquelle kam eine Bogenlampe zur Verwendung. Das Objektiv und das Okular des verwendeten Zeiß'schen Mikroskopes wurden dem Zwecke des Versuches entsprechend jeweilig angepaßt.

Bei Betrachtung verschieden behandelter Oele diente zur Unterbringung eine Cüvette, wie sie in der Ultramikroskopie üblich ist. Die Untersuchungen über das Verhalten des Oeles im elektrischen Feld erforderten eine in Abbildung 1 skizzierte Spezialeinrichtung.

Unter das Objektiv des Mikroskops wird eine innen ölfestgeschwärzte Metallwanne w von 3 cm Höhe und der Grundfläche 3×6 qcm gestellt. Die Vorderwand hat in der Mitte ein Fenster f von 4 mm ∅ aus 0,1 mm starkem Deckglas. Die Wanne w ist $^3/_4$ mit Oel gefüllt, in das das Objektiv direkt eingeführt wird. Der durch das Linsensystem von der Bogenlampe kommende Lichtstrahl tritt in das Fenster f ein und muß senkrecht auf diesem stehen. Die Elektroden e sind durch den Klemmring k fest mit dem Mikroskop verbunden, und jede ist mit einer eigenen Reguliervorrichtung r versehen, die eine genaue Einstellung in vertikaler Richtung und eine Verstellung des Elektrodenabstandes gestattet. Die Elektroden sind auswechselbar, und zwar wurden benutzt: Spitzen-, Kugel- und Plattenelektroden nach Abb. 2.

Die Elektroden werden stets symmetrisch zur Mitte des Gesichtsfeldes eingestellt: Abb. 3. Ihre Einjustierung auf das

Gesichtsfeld des bereits eingestellten Mikroskopes ist für die Beobachtung äußerst wichtig. Die Einstellung des Lichtstrahles, die in Zukunft durch E und den entsprechenden Index, z. B. Ea gemäß Abb. 4, abgekürzt werden soll, ist bei den einzelnen Versuchen sehr verschieden. Nach Abb. 4a ist ein scharfer Tyndallkegel hergestellt. Die Elektroden liegen vollkommen im Dunkelfeld, sind aber infolge von Diffusion ausreichend sichtbar. Durch Verschiebung des Lichtstrahles läßt sich die ganze Fläche zwischen den Elektroden ableuchten.

Abb. 4b: Bei vielen Versuchen muß auf einen scharfen Tyndallkegel verzichtet werden, z. B. wenn es gilt, den ganzen Raum zwischen den Elektroden zu beobachten. Die Spitzen sind hierbei auch im dunkeln Feld zu belassen.

Abb. 4c: Wenn es erforderlich ist, sei es auch nur die äußerste Spitze einer Elektrode zu beleuchten, so hat der Versuch nur wenig Anrecht darauf, als ultramikroskopisch zu gelten.

Abb. 4d: Sollen nicht zwischen den Elektroden, sondern in ihrer Nähe Beobachtungen angestellt werden, so hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Elektrode e unterhalb des Lichtstrahles L, der in der Abbildung senkrecht auf der Bildebene steht, einzustellen. Natürlich ist auch hierbei Reflektion nicht zu vermeiden.

Weit ungünstiger als bei Spitzenlelektroden, liegen die Verhältnisse bei Kugel- und Plattenelektroden, da sie infolge ihrer größeren Oberfläche die im Oel bestehenden diffusen Lichtstrahlen stärker reflektieren. Bei Kugelelektroden besteht ferner die Schwierigkeit einer scharfen Einstellung des kürzesten Elektrodenabstandes auf das Gesichtsfeld des Mikroskopes, während Plattenelektroden mit dieser Apparatur nicht genau parallel gestellt werden konnten.

Das geschilderte Einstellen von Elektroden und Lichtstrahlen kann nur Anspruch darauf erheben, als allgemeine Richtlinie zu gelten, und ist im besonderen dem Gefühl des Beobachters zu überlassen.

b) Die Versuchsergebnisse[1]).

V 1) Verschieden behandelte Oelproben lassen sich qualitativ durch Zahl und Größe der Submikronen sehr wohl voneinander unterscheiden; jedoch wäre es nicht angebracht, verschieden behandelte Oele etwa durch Abzählen der Teilchen zu identifizieren. Unbenutztes und nicht vorbehandeltes Oel mit der Durchschlagsfestigkeit von 155 KV/cm enthält z. B. deutlich erkennbar Teilchen verschiedener Größe.

Das gleiche Oel nach einstündigem Erhitzen auf 120° C hatte eine Durchschlagsfestigkeit von 195 KV/cm. Größere Teilchen waren verschwunden, und die übrigen erweckten den Anschein, etwa gleicher Größenordnung zu sein. Diese Beobachtung läßt darauf schließen, daß die vorher vorhandenen größeren Teilchen aus Wasser bestanden haben.

Das Oel bis zur Siedetemperatur erhitzt und 5 Min. gekocht, zeigt eine deutliche Vermehrung der Submikronen. Durch noch längeres Kochen läßt sich eine weitere Vermehrung beobachten. Die neu entstandenen Teilchen scheinen kleiner zu sein, als die bereits vorhandenen. Durch die chemische Veränderung des Oeles beim Kochen entstehen also neue, sehr kleine Partikel.

Gelangt Wasser durch Wasserdampf in das Oel, so lassen sich Wasserteilchen als solche nicht erkennen. Es fragt sich überhaupt, ob Wasser in feinster Verteilung sichtbar wird.

Bei einemulgiertem Wasser sind die Wasserteilchen erkennbar, auch wenn sie in ihrer Größe von den übrigen Beimengungen sich sehr wenig unterscheiden; und zwar sind sie nicht so scharf begrenzt, wie die anderen Teilchen.

Gebrauchtes Oel läßt, neben den bisherigen sternartigen Teilchen, auch kleine Fasern erkennen.

V 2) Die Bildung von Brücken zwischen den Elektroden läßt sich mit Hilfe des Ultramikroskopes sehr deutlich verfolgen. Unter dem Mikroskop sind ähnliche Beobachtungen von verschiedenen Seiten angestellt, und Oelschläger[2]) hat

---

[1]) Abkürzung: V mit laufender Nr. d. Versuches, z. B.: V_1.

[2]) Siemens-Zeitschrift 1925, Heft 1.

sehr schöne Aufnahmen fertiger Brücken veröffentlicht. Einzelne Teilchen sind nach den bisherigen Versuchsanordnungen jedoch nur zu beobachten gewesen, wenn sie verhältnismäßig groß waren. So konnte auch Oelschläger an trockenem Oel erst bei 140 Volt (6 KV/cm) zwischen Kugel-Elektroden im Abstand von 0,25 mm eine Bewegung im Oel bemerken. Unter dem Ultramikroskop ist es nun möglich, das Verhalten kleinster Teilchen zu beobachten und ihre Mitwirkung bei dem Aufbau der Brücken von den ersten Anfängen an zu verfolgen. Bereits bei einer Spannung von 1 Volt zwischen Spitzenelektroden im Abstand von 0,1 mm (ca. 0,3 KV/cm) und Lichtstrahleinstellung Ea, Eb oder Ec wurde eine Bewegung der einzelnen Teilchen beobachtet. Ueber die Bewegungsrichtungen vor der Berührung mit den Elektroden wird in V_6 berichtet. Ist ein Teilchen an eine Spitze gelangt, so bleibt es entweder dort haften oder wird abgestoßen und zur anderen Elektrode getrieben. Auf den haftengebliebenen Teilchen setzen sich neue fest, und es bilden sich auf diese Weise haarfeine Zungen, die das Bestreben haben, sich loszureißen, und die nach der anderen Elektrode gerichtet sind. Neue Teilchen setzen sich mit Vorliebe an den Spitzen der Zungen fest, deren Verlängerung fortschreitet, bis sich beide begegnen und eine fadenartige Verbindung zwischen den Elektroden herstellen. Die Brücke verläuft nicht gradlinig, weshalb auch häufig Teile von ihr über oder unter dem eingestellten Gesichtsfeld des Mikroskopes liegen. Das Tanzen größerer Fasern, die sich — wie eben geschildert — aus kleinen Teilchen bilden, erfolgt bei Spannungen unterhalb etwa 10 Volt selten. Bei höheren Feldern dagegen entspricht das Spiel zwischen den Elektroden dem von Oelschläger geschilderten unter dem Mikroskop.

V 3) Es wurde mittels Stoppuhr die Zeit gemessen, die ein von einer Spitze abgestoßenes Teilchen brauchte, um zur anderen Elektrode zu gelangen. Die Zeiten und Geschwindigkeiten für verschiedene Spannungen sind in der folgenden Tabelle für den Elektrodenabstand von 0,45 mm zusammengetragen.

Volt	Zeit (Sek.)			Geschwindigkeit
	Mittel	min.	max.	cm/Sek. $\times 10^{-3}$
16	65	58	71	0,69
32	33	30	37	1,36
49	18	13	19	2,5
66	9	8,5	16	5

Die Zeiten sind die Mittelwerte aus je 20 Messungen. In Abb. 5 sind die entsprechenden Kurven[3]) ersichtlich.

V 4) Die Bewegungsrichtung eines abgestoßenen Teilchens läßt erkennen, daß seine Bahn anfangs etwa mit einer Kraftlinie zusammenfällt. Von einer Spitze abgestoßen, begibt es sich gradlinig zur anderen Spitze, während es von einer anderen Stelle aus nach Abb. 6 flache Kurven beschreibt.

V 5) Die von den Elektroden abgeschossenen Teilchen werden häufig in ihrer Bewegung gestört, indem sie auf andere Teilchen stoßen, die sich nur langsam oder gar in entgegengesetzter Richtung bewegen. Bei sehr unreinem Oel wird die Störung so groß, daß die Teilchen die andere Elektrode nicht erreichen.

V 6) Außer der Abstoßung, die die Teilchen erfahren, wenn sie mit einer Elektrode in Berührung kommen, besteht noch eine andere Bewegung, die durch die Divergenz der Kraftlinien an den Teilchen höherer Dielektrizitätskonstanten bewirkt wird. Die Strömung geht zu den Elektroden hin (Abb 7) und ist räumlich aufzufassen. Teilchen bestimmter Ladung werden nicht bevorzugt, sondern alle links der Fläche a—b sich befindenden wandern nach links, die anderen nach rechts. Die Bewegung ist nicht etwa allein zur äußersten Spitze der Elektroden gerichtet, es gehen auch sehr viele Teilchen an den Elektroden vorbei. Das Gesamtbild der Bewegung ist, auf die Verbindungslinie der beiden Spitzen bezogen, symmetrisch.

---

[3]) Bis zu etwa 40 Volt nimmt die Geschwindigkeit konstant mit der Spannung zu.

Die Fläche a—b (Abb. 15) liegt der Mitte um so näher, je trockener das Oel ist. Bei gekochtem Oel liegt sie genau in der Mitte (Abb. 7)[4]).

V 7) Die Teilchen, die bei der Bewegung nach 6 in Berührung mit einer Elektrode kommen, führen die Bewegung nach V_4 und V_5 aus. Die anderen Teilchen, soweit sie nicht an den Elektroden vorbei aus dem Gesichtsfeld verschwinden, lagern sich an den Elektroden ab und erzeugen im Laufe der Zeit ein schwammartig aussehendes Gebilde (Abb. 8). Die Bewegung ist nach 24 Stunden dieselbe geblieben, jedoch ist eine Abnahme der Anzahl der Teilchen im Raum zu bemerken. Hier kann aber auch eine Täuschung vorliegen, da durch die Ansammlung an den Elektroden die Lichtverhältnisse ungünstiger werden. Neue an die „Wolke“[5]) (Abb. 8) herantretende Teilchen setzen sich außen an, so daß eine Berührung der Elektroden und somit ein Abstoßen nach V_4 immer seltener wird. Die geschilderte Ansammlung kommt bei Spannungen über ca. 50 Volt schwerer zustande, da durch die kräftige Abstoßung infolge der Aufladung nach V 3 diese Erscheinung zurückgedrängt wird.

V 8) Wechselt man die Polarität der Elektroden, nachdem sich eine Wolke an ihnen gebildet hat, so werden die Teilchen mit großer Gewalt auseinander getrieben, und es findet eine Revolution der bisherigen Bewegung statt. Diese Erscheinung läßt darauf schließen, daß die einzelnen Teilchen der Wolke noch eine Ladung tragen, die das entgegengesetzte Vorzeichen hat von der nahen Elektrode. Die Revolution ist umso größer, je größer die Wolke war, d. h. je länger das Oel unter Spannung gestanden hat. Nach einiger Zeit stellt sich wieder die alte Bewegung ein.

V 9) Auch wenn die Spannung nur kurze Zeit an den Elektroden gelegen hat und noch keine Ansammlung zu beobachten ist, findet beim Umpolen eine Revolution in der vorhandenen Bewegung statt.

[4]) Siehe auch V_{12}, V_{26} und V_{18}.

[5]) Siehe S. 37.

V 10) Die Intensität einer solchen Revolution ist in jedem Falle um so größer, je länger das Feld vorher bestanden hat, und macht sich geltend nicht nur durch impulsivere Abstoßung, sondern auch durch längere Dauer. Die Zeit, die nach dem Umpolen bis zur Herstellung der alten Bewegung vergeht, läßt sich zahlenmäßig verfolgen und ist für verschieden behandeltes Oel verschieden. Es wurde zu diesem Zwecke in bestimmten Zeitabständen eine Umpolung vorgenommen. Diese Zeit ist in der folgenden Tabelle und den zugehörigen Kurven (Abb. 9) mit Umpolzeit bezeichnet. Nach jedem Polwechsel wurde, in dem Sinne wie soeben angegeben, die Dauer der auftretenden Revolution gemessen[6]).

10a) angeliefertes Oel (Durchschlag 155 KV/cm).

Spannung	Umpolzeit	Revolution		
Volt	Min.	Sek.: Mittel	min.	max.
10	1	19	15	26
23	1	21	17	27
29	1	16	9	23
36	1	12	8	15
45	1	9	5	13
55	1	7	3	9

Umpolzeit	Volt	Revolution	Volt	Revolution
Min.		Sek.		Sek.
1,5	50	10	30	15
2	50	13	30	24
3	50	14	30	26
5	50	17	30	29

10b) gekochtes Oel (1 Stunde 150° C).

Umpolzeit	Volt	Revolution	Volt	Revolution
Min.		Sek.		Sek.
2	40	23	20	38
3	40	25	20	43
5	40	28	20	49

[6]) S. 47.

V 11) Kurz nach dem Abkochen fand keine Revolution nach dem Umpolen statt. Die Tabelle V 10b wurde erst aufgenommen, nachdem das Oel einige Zeit unter Spannung gestanden hatte.

V 12) Wesentlich anders sind die Bewegungserscheinungen in wasserhaltigem Oel. Während bei trockenem Oel die Polarität keine Rolle spielt, findet bei wasserhaltigem eine Bewegung vom positiven zum negativen Pole statt. Schwach wasserhaltiges Oel zeigt schon nach V_6 eine Unsymmetrie in der Bewegung. Je wasserhaltiger nun das Oel ist, desto näher rückt die Ebene a—b gemäß Abb. 15 an den positiven Pol heran, bis schließlich nur noch eine Bewegung zum negativen Pol übrig bleibt: (Siehe V_{18}).

V 13) Entsprechend V_{12} ist auch bei wasserhaltigem Oel die Dauer der Revolution nach V_{10} nicht unabhängig von der Polarität. Die Bewegung vom positiven zum negativen Pol tritt stets hervor. Von der zahlenmäßigen Bestimmung der Revolution wurde — nach einer großen Zahl von Vorversuchen — hierbei abgesehen. Jedoch ist es denkbar, mit einer noch weiter ausgebauten Versuchsanordnung und entsprechender Eichung der Apparatur den Wassergehalt des Oeles zahlenmäßig anzugeben. Es ließe sich möglicherweise so eine Einrichtung schaffen, die die Schwierigkeit beheben würde, die geringsten Spuren von Wasserbeimengungen festzustellen[7]).

V 14) Zur weiteren Verfolgung der Vorgänge bei wasserhaltigem Oel wurden verschiedene Elektroden-Anordnungen gewählt, von denen hier nur die nach Abb. 2c, in der sich zwei Platten gegenüber stehen, und die nach Abbildung 10, mit einer Spitze und einer Platte, erwähnt sein mögen. Es sei besonders hervorgehoben, daß bei diesen Versuchen das Abstoßen der Teilchen beobachtet wurde, die mit den Elektroden in Berührung kamen.

Bei Plattenelektroden im Abstand von ca. 0,5 mm ist die Abstoßung bei 70 Volt nicht allzu stark und erfolgt in beiden Richtungen.

[7]) S. 47.

Je trockner das Oel ist, desto mehr Teilchen erreichen die andere Elektrode, während sie bei stark wasserhaltigem Oel bald zur Ruhe kommen und dann der in V_{12} geschilderten Bewegung folgen.

Umgepolt schlugen die einzelnen Partikelchen die entgegengesetzte Richtung ein, um dann wieder umzukehren. Da kein divergierendes Feld vorliegt, wird die Bewegung nur durch Aufladung verursacht.

V 15) In den Skizzen Abb. 10 sind die Richtungen der abgestoßenen Teilchen durch Pfeile angegeben; die relative Intensität der Abstoßung ist durch die Zahl der Pfeile charakterisiert. In Abb. 10a brauchte ein Teilchen, um von der Spitze zur Platte zu gelangen, ca. 5 Sek., in b von der Platte zur Spitze mehr als 60; in c erreichten die Teilchen kaum die Platte, und in d war diese Bewegungserscheinung sehr gering. Da bei positiver Spitze und negativer Platte die Bewegung von der Spitze weggerichtet ist, müssen die durch Aufladung bedingten Kräfte hier überwiegen. Dies und die Umkehr der Bewegung beim Umpolen deuten darauf, daß der Fluß bei wasserhaltigem Oel vom Positiven zum Negativen geht. Die Bewegung bei feuchtem Oel ist langsam, weil die Teilchen mit mehr entgegengesetzt geladenen zusammentreffen und ihre Ladung dabei abgeben.

V 16) Bei den Versuchen V_{14} und V_{15} macht sich der Unterschied von durch Wasserdampf eingeführtem und einemulgiertem Wasser geltend. Hineingedampft, werden die Teilchen weniger weit abgestoßen. Das Oel ist durch die feine Verteilung offensichtlich in bestimmter Weise polarisiert und nimmt den von den Elektroden aufgeladenen und dann abgeschossenen Teilchen sehr schnell ihre Ladung ab. Bei einemulgiertem Wasser wird die abstoßende Bewegung weit weniger unterdrückt.

V 17) Diese Erscheinungen müssen natürlich auch einen Einfluß haben auf die Bildung von Brücken. In der Tat zeigt sich, daß bei durch Dampf eingeführtem Wasser und niedriger Spannung nur schwer eine Brücke zustande kommt, während sie bei einemulgiertem Wasser unter den gleichen sonstigen

Bedingungen sehr gut zu beobachten ist. Es zeigten sich z. B. zwischen Platten im Abstand von 0,5 mm bei 70 Volt sehr schöne Brücken, in denen nach Abb. 11 Wasserkügelchen w im Verein mit anderen suspendierten Teilchen s sich kettenartig zusammensetzten.

V 18) In V_6 wurde die Unsymmetrie der durch Polarisation hervorgerufenen Bewegung bei verschiedenem Reinheitsgrad des Oeles beobachtet. Die Verschiebung der Ebene (in Abb. 15 a—b wurde für wasserhaltiges Oel zahlenmäßig bestimmt. Gereinigtes Oel mit der Durchschlagsfestigkeit 260 KV/cm wurde in der von Friese angegebenen Weise, jedoch nicht in Gewichts-, sondern in Volumenverhältnissen mit Wasser vermischt.

Die Messungen sind bei 40 Volt zwischen Spitzenelektroden im Abstande von 0,45 mm vorgenommen. Gereinigt lag die Fläche a—b Abb. 7 genau in der Mitte zwischen den Elektroden. Mit Wasser vermischt, hatte sie von dieser Lage folgende Verschiebungen zur negativen Elektrode:

Wassergehalt in $^0/_{00}$		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Verschiebung in mm	min.	0,04	0,11	0,16	0,18	0,18
	max.	0,09	0,16	0,2	0,2	0,21
	Mittel	0,07	0,15	0,18	0,19	0,19

In Abb. 12 sind die einzelnen Werte eingetragen. Die Messungen müssen mit größter Sorgfalt vor allen Dingen hinsichtlich der Reinigung des Oelgefäßes und der Elektroden ausgeführt werden und sind z. T. sehr unsicher. Trotzdem ist aber durch diesen Versuch ein Weg gezeigt, den Wassergehalt des Oeles zu bestimmen. Durch weiteren Ausbau dieser Methode und entsprechende Eichung der Apparatur würde es gelingen, geringe im Oel befindliche Mengen Wasser zahlenmäßig anzugeben[8]).

V 19) Unter dem Ultramikroskop läßt sich erkennen, daß einzelne Wasserteilchen durch das elektrische Feld zersetzt werden. Zur Verwendung kommen am besten Spitzen-

[8]) S. 47.

elektroden und Oel mit einemulgiertem Wasser, in dem Tröpfchen bei Lichtstrahleinstellung Ea und Eb als solche erkennbar sind. Gelangte bei angelegter Spannung (ca. 50 Volt und 0,3 mm Elektrodenabstand) ein Wasserabstand an eine der beiden Spitzen, so vergrößerte sich deutlich merkbar sein Durchmesser, und nach einiger Zeit stieg es nach oben. Es bewegte sich also senkrecht zur Bildfläche, um bald aus dem eingestellten Gesichtsfeld des Mikroskopes zu verschwinden. Bei größerem Teilchen lösten sich erst eine Reihe einzelner Bläschen von dem Wasser ab, bis es vollkommen zersetzt war.

V 20) Wasserfreies und wasserhaltiges Oel sind auch in kleinen elektrischen Feldern durch die Bewegung der suspendierten Teilchen voneinander zu unterscheiden. Abgesehen von den bisher geschilderten Bewegungserscheinungen führen die Wasserteilchen auch in einem Abstande von den Elektroden noch eine Bewegung aus, die nach oben, also gegen den Sehstrahl gerichtet ist. Diese Bewegung macht sich, wie unter V_{19}, durch die Vergrößerung des Volumens und das Verschwinden der Teilchen aus dem Gesichtsfeld bemerkbar. Ein solches Aufsteigen von Teilchen bei wasserfreiem Oel ist gegen die Häufigkeit bei wasserhaltigem mit selten zu bezeichnen.

Zu beachten ist natürlich, daß die Teilchen nicht etwa durch Wärmeströmung oder dergl. in gleicher Weise bewegt werden, d. h., vor der Einschaltung der Spannung muß in dem Oel vollkommene Ruhe herrschen.

Die Ursache der geschilderten Bewegung ist der Auftrieb, den das Teilchen erfährt, nachdem es unter dem Einfluß des Feldes ganz oder wenigstens bis zu einem gewissen Grade elektrolytisch in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt ist.

B. Sonstige Untersuchungen.

V 21) In stark wasserhaltigem Oel läßt sich das entwickelte Gas mit unbewaffnetem Auge beobachten. In einem Zylinderkondensator, dessen Außenelektrode eine mit einer

Metallspirale umwickelte Glasröhre von 15 mm ∅ bildete, wurde Oel untergebracht, das durch Wasser sehr wenig getrübt war. Beim Anlegen einer Spannung von 5000 Volt entstanden nach kurzer Zeit an der 0,2 mm ∅ Innenelektrode deutlich sichtbare, strichförmige Nebel (Abb. 13a).

Wurde jetzt die Spannung abgeschaltet, so zeigten die Nebel das Bestreben nach oben zu steigen und stellten sich nach Abb. 13b ein. Beim Wiederherstellen des Feldes kehrt sofort das Bild 13a zurück.

Die aufsteigende Tendenz der Nebelfasern läßt darauf schließen, daß sie aus Knallgas bestehen. Würde das Wasser in unzersetztem Zustand die Nebelfasern bilden, so müßten diese die Neigung haben, sich gemäß Abb. 13c nach unten zu biegen.

V 22) In stark wasserhaltigem Oel lassen sich diese Zersetzungserscheinungen auch zahlenmäßig bestimmen. Zur Feststellung, wann die Gasentwicklung einsetzt, wurden 5 Glasröhren mit 10 mm ∅ innen (Abb. 14) mit der gleichen Oelmischung gefüllt. An die eingeführten parallelen zylindrischen Elektroden von 0,65 mm ∅ und 2 mm Abstand wurden die in Abb. 24 eingetragenen Spannungen angelegt. Zur Sichtbarmachung im Bilde läßt sich das Aufsteigen der Gasblasen benutzen, um das Entstehen von Brücken aus anderen Beimengungen zu verhindern. Das Oel wurde deshalb nicht nur mit Wasser, sondern auch mit Ruß von einer Paraffinkerze vermischt. Abb. 25 zeigt die abgesetzten Rußteilchen an den Elektroden bei wasserfreiem Oel. Zum Vergleich dazu können wir der Abb. 24 entnehmen, daß bei 230 Volt Elektrodenspannung die Brückenbildung am größten ist, während sie bei höheren Spannungen durch die aufgestiegenen Blasen unterdrückt wurde und bei 575 Volt nur verhältnismäßig gering ist. Bei dieser Versuchsanordnung fand die größere Gasentwicklung an der Oberfläche des Isoliermaterials statt, das die Elektroden an ihrem unteren Ende auseinander hielt, wodurch die Abb. 24 nur relative Bedeutung haben kann. Durch genauere Messungen wurde der Beginn einer offensichtlichen Gasentwicklung an frei in das Oel ragenden Elektroden von

d = 0,065 cm ∅ im Abstande von a = 0,2 cm bei 270 Volt festgestellt. Der Radius des Gefäßes betrug R = 0,5 cm.

Da a^2 gegen 4 R^2 klein ist, ist die größte auftretende Feldstärke nach Benischke[9])

$$Hr = \frac{E}{2r \ln \frac{a}{r}} = \frac{270}{0{,}065 \ln \frac{0{,}2}{0{,}0325}} = 2{,}3 \text{ KV/cm.}$$

V 23) Zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit des entwickelten Gases wurde ein eigens dazu bestimmter Apparat nach Abb. 16 konstruiert, den Abb. 16a und 16b im Schnitt zeigen. In dem aus Paraffin bestehenden Körper P wurden im Abstande von 2 mm Metallrahmen angebracht, die nach Abb. 16b mit 0,4 mm Cu-Draht besponnen waren. An die Vorder- und Hinterseite des Paraffins wurde je eine Glasscheibe S geschmolzen, so daß der entstehende Raum E in geeigneter Weise durch Oeffungen im Paraffin mit Oel angefüllt werden konnte. Zwischen je zwei benachbarten Metallrahmen mit ihrer Drahtbespinnung herrschte durch Parallelschaltung eine Wechselspannung von 250 Volt.

In dem ganzen Elektrodenraum wurde nun das in dem Oel enthaltene Wasser zersetzt, und das Gas stieg in feinen Bläschen nach oben; diese sammelten sich in dem Gasraum G, aus dem sie nach etwa 10 Stunden alles Oel verdrängt hatten.

Durch den Gasraum führten 2 parallele Cu-Drähte von 2r = 0,25 mm und dem Abstande a = 2 mm, die mit den Polen eines Transformators verbunden waren. Bei langsamer Spannungssteigerung erfolgte schließlich eine kleine Explosion. Das Paraffin wurde dabei gespalten, so daß der Apparat zu jeder Messung neu hergestellt werden mußte. Die Explosionen erfolgten bei den Spannungen 1380, 1470, 1490 und 1440 Volt (Mittel 1445 Volt).

Die Durchschlagsfestigkeit bestimmt sich aus

$$Hr = \frac{E}{2r \ln \frac{a}{r}} = \frac{1445}{0{,}025 \ln \frac{0{,}2}{0{,}0125}} = 20{,}9 \text{ KV/cm.}$$

---

[9]) Benischke, „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik", 5. Aufl. S. 51.

V 24) Die Durchschlagsfestigkeit des aufsteigenden Gases wurde noch auf andere Weise geprüft. Das Gas wurde in einem Reagenzrohr nach Abb. 17 aufgefangen; zwei Kugelelektroden mit 2,3 mm ∅ waren im Abstande von ca. 0,5 mm in die Gasblase gebracht.

Der Durchschlag erfolgte bei 1410 Volt. Mit der gleichen Funkenstrecke trat in freier Luft[10]) der Funkenübergang bei im Mittel 1950 Volt auf; es verhalten sich aber etwa

$$\frac{D}{30000} = \frac{1410}{1950}, \text{ sodaß } D = 21{,}7 \text{ KV/cm.}$$

V 25) Um den Einfluß der Temperatur auf die Zersetzung bei wasserfreiem und auch bei wasserhaltigem Oel festzustellen, wurden zwei parallele Zylinderelektroden von 2 mm ∅ im Abstande von 4 mm in ein Reagenzrohr eingeführt, das durch ein Oelbad erhitzt werden konnte. Im durchscheinenden Licht wurde der Raum zwischen den Elektroden beobachtet. Ist das Reagenzrohr mit wasserhaltigem Oel gefüllt, so bilden sich im elektrischen Feld Bläschen und Fasern, die nach oben steigen, bezw. die das Bestreben haben, dies zu tun. Bei trockenem, sauberem Oel entstehen in ausreichenden Feldern und bei höheren Temperaturen nach wenigen Minuten feine Brücken aus Material, dessen spezifisches Gewicht schwerer ist als das des Oeles; denn beim Abschalten der Spannung fallen sie nach unten. Bei Zimmertemperatur und bei gleicher Spannung traten selbst nach mehrstündiger Belastung solche Brücken nicht ein, so daß sie nicht etwa aus von vornherein suspendierten Teilchen entstanden sind. Auch zeigte sich diese Erscheinung nicht, nachdem das Oel 1 Stunde lang auf 110° gehalten und vor dem Einschalten der Spannung wieder auf Zimmertemperatur gebracht war. Die Temperaturerhöhung allein, ohne das elektrische Feld, ist also auch nicht für die Zersetzung verantwortlich zu machen. Gasblasen waren hierbei nicht zu beobachten. Es wurden die zusammengehörigen Spannungen und Temperaturen festgestellt, bei denen eben das

[10]) Die Durchbruchsspannung in Luft beträgt angenähert 30 KV/cm.

Einsetzen solcher Brücken und Fasern beobachtet werden konnte, und zwar ergab sich:

	für wasserhaltiges Oel						für sauberes Oel	
C°	17	30	50	70	80	95	65	130
Volt	720	590	420	180	240	230	780	450

Die Werte sind in Abb. 18 zusammengetragen, wo die Spannungen wie in V_{22} in Feldstärken umgerechnet sind.

Da bei den Versuchen die offensichtliche Zersetzung beobachtet wurde, und die Zeit, in der das Oel dem Felde ausgesetzt ist, eine wesentliche Rolle spielt, können sie nur von relativer Bedeutung sein[11]).

V 26) Der Versuch soll Aufschluß darüber geben, in welcher Zeit feste Verunreinigungen durch Polarisation[12]) dem Oel entzogen werden. Es wurde zu diesem Zwecke mit Ruß von Paraffinkerzen vermischtes Oel in Reagenzrohre gefüllt, in denen parallele Elektroden (Abb. 14) angebracht waren. Nach Ablauf einiger Zeit setzten sich die Teilchen an den Elektroden, wie es die Abb. 26 in ca. 15facher Vergrößerung an einem Draht von 0,1 mm ∅ zeigt, fasernartig fest. Zur Herstellung der Abb. 27 und 28 wurden Reagenzrohre von 10 mm ∅ benutzt und zur Aufhebung der Linsenwirkung in eine 11 mm breite Glaswanne gesetzt, die mit klarem Oel gefüllt war. Die Aufnahmen wurden im durchscheinenden Licht vorgenommen und die zusammengehörenden Bilder, d. h. die Abb. 27a und b und 28a und b photographisch gleichmäßig behandelt.

Die auf den Bildern sichtbaren dunkelen Nebel in der Nähe der Elektroden lassen die Trübung des Oeles durch die Beimengungen erkennen. Sie nehmen mit dem Abstand von den Elektroden ab, da ja infolge der Wölbung der Gläser der Lichtstrahl eine nach dem Rande eines jeden Glases abnehmende verunreinigte Schicht zu durchsetzen hat. Die Stärke der Nebel zeigt auch, in den vor dem Einschalten der Spannung vorgenommenen Aufnahmen nach den Abb. a, annähernd die

[11]) Weiteres siehe S. 30 und 41.

[12]) V 6.

Stärke des Rußgehaltes an; während alle 8 Gläser der Abb. 27 über den gleichen Rußgehalt verfügen — Abweichungen der Nebelstärke auf dem Bilde sind durch kleine Unregelmäßigkeiten in der Aufstellung der Gläser usw. entstanden —, nimmt dieser nach Abb. 28 von links nach rechts zu. Andererseits herrscht zwischen den Elektroden der Abb. 28 in jedem Glase die gleiche Spannung von 230 Volt, wogegen in 27 die Spannungen von links nach rechts zunehmen. In Abb. 27b tritt hervor, in welcher Weise die Befreiung von Rußteilchen von der Spannung abhängt. Bei 115 Volt konnte dem Oel in 12 Stunden nur sehr wenig Ruß entzogen werden, während bei 920 Volt der Raum zwischen den Elektroden dicht damit ausgefüllt ist. Abb. 28 zeigt, wie die Bildung von Schlamm dem Schmutzgehalt proportional ist, und daß selbst nach 48 Stunden wenigstens an den rechten Gläsern noch Trübungen zu sehen sind. Durch sorgfältige Beobachtung wurde nun festgestellt, daß nach einer bestimmten Zeit die Trübung des Oeles bei konstant gehaltener Spannung nicht mehr merkbar abnimmt. Durch Kombination von 2 Versuchsreihen (gemäß Abb. 27 und 28) und unter Zuhilfenahme des Ultramikroskopes lag die Spannung, die nach Erreichung des Endzustandes noch Teilchen zurückließ, deren Größenordnung etwa der entspricht, die durch Lichtbogen entstandene Teilchen besitzen, zwischen den Spannungen 345 und 460 Volt. Mit anderen Worten, die Feldstärke

$$Hr = \frac{e}{2\,r \ln \frac{a}{r}} = \frac{460}{0{,}065 \ln \frac{0{,}2}{0{,}0325}}$$

mit ca. 4 KV/cm ist mit Sicherheit in der Lage, aus dem Oel größere Verunreinigungen an die Elektroden zu ziehen, und zwar sind zu diesem Vorgange mehr als 12 Stunden erforderlich. (Siehe weiteres S. 45.)

III. Betrachtungen über die Durchschlagsfestigkeit von Isolieröl.

Die Versuche V. 21 und V. 22 zeigen, daß Wasserbeimengungen schon in kleinen elektrischen Feldern eine offensichtliche Zersetzung erfahren. Diese Tatsache führt zu der Vermutung, daß bei den hohen Spannungen, denen das Oel im Betriebe und bei der Bestimmung seiner Durchschlagsfestigkeit ausgesetzt ist, das Wasser noch lebhafter in seine Bestandteile zerlegt wird. Auch Wasserteilchen, die frei im Raume schweben und nicht mit den Elektroden in Berührung kommen, bleiben von dieser Zersetzung nicht verschont. Als Beweis dafür kann der V. 20 angeführt werden; jedoch ist er nicht hinreichend, und wir wollen daher ganz allgemein prüfen, ob Bedingungen vorhanden sind, die in der Tat eine solche Zersetzung zur Folge haben können.

Eine Wasserkugel befindet sich nach Abb. 19 zwischen 2 Platten, an denen die Spannung E Volt herrscht, und deren Abstand voneinander a cm betrage. Das Wasserteilchen wird von dem Kraftfluß durchsetzt, und die zwischen den gegenüberliegenden Punkten g_1 und h_1 herrschende Spannung e errechnet sich angenähert aus der Beziehung

$$\frac{e}{E-e} = \frac{k_ö\, d}{k_w\,(a-d)}$$

worin $k_ö$ und k_w die Dielektrizitätskonstanten des Oeles und des Wassers bedeuten. d ist der Durchmesser der Wasserkugel. Da d gegen a, und e gegen E sehr klein sind, kann man schreiben

$$e = \frac{E\, k_ö\, d}{k_w\, a}\,. \qquad (1)$$

Teilt man die senkrecht auf g_1—h_1 stehende größte Kreisfläche S—T der Kugel in z Flächenelemente dq, dann wird das Element, das von der Verbindungslinie g_1—h_1 getroffen wird, von dem Strome

$$i = \frac{E\, k_ö\, d\, dq}{k_w\, a\, c\, d} \qquad (2)$$

durchflossen, wobei $\frac{c\, d}{dq}$ den Widerstand der Strombahn von g_1 bis h_1 angibt. c ist der spezifische Widerstand des Wassers.

Dieser das Wasser durchfließende Strom muß nach dem Faraday'schen Gesetz der Elektrolyse auf der Strombahn g_1—h_1 mit dem Querschnitt dq eine Zersetzung zur Folge haben, bei der sich das Gewicht eines ausgeschiedenen Elementes bestimmt zu

$$G = 10{,}4\ 10^{-6}\, \frac{o}{y}\, i\, t\,.$$

o ist das Atomgewicht, y die Wertigkeit des betreffenden Elementes. Gleichung 2 eingesetzt, ergibt eine auf der Strombahn g_1—h_1 erzeugte Wasserstoffmenge von

$$G = 10{,}4 \cdot 10^{-6}\, t\, \frac{E\, k_ö\, dq}{k_w\, a\, c}\,, \qquad (3)$$

da für Wasserstoff $\frac{o}{y} = 1$ ist.

Die gleiche Ueberlegung läßt sich sinngemäß übertragen auf alle anderen Stromfäden der Länge h^2—g^2 bzw. h^3—g^3 . . ., und wir können allgemein sagen, daß die Zersetzung des Wasserteilchens im Oel außer von Materialkonstanten von folgenden Faktoren abhängt:

1. von der Elektrodenspannung,
2. von der Größe der Teilchen und von deren Form,
3. von der Zeit, während der das Teilchen sich im Felde befindet.

Es läßt sich auch zeigen, daß die fast vollkommene Zersetzung von Wasserteilchen in Frage kommender Größe wenigstens innerhalb der Zeit erfolgt, die bei den üblichen Versuchsanordnungen vom Anlegen der Spannung bis zur Erreichung des Funkenpotentiales vergeht. Von zahlenmäßigen Angaben darüber soll hier Abstand genommen werden, da sie mit großer Unsicherheit naturgemäß behaftet sein müssen.

Wir wollen der vorstehenden Rechnung in Ergänzung der Experimente V. 21 und V. 22 zunächst nur entnehmen, daß die Bedingungen für die Zersetzung von Wasserbeimengungen im elektrischen Feld gegeben sind.

Diese Erkenntnis führt einen Schritt weiter in der Beurteilung der Vorgänge über die Durchschlagsfestigkeit von wasserhaltigem Oel. Es befindet sich nicht nur Oel zwischen den Elektroden, denn eine einfache Rechnung läßt erkennen, daß auch das entstandene Gas als Dielektrikum nicht zu vernachlässigen ist. Die Abb. 20 zeigt das Verhältnis $\frac{V_ö}{V_g}$ bei verschiedenem Wassergehalt, wogegen im Vergleich das Verhältnis $\frac{V_ö}{V_w}$, das in größerem Maßstab eingezeichnet ist, verschwindet.

Nach den Gesetzen über zusammengesetzte Dielektrika wird ohne Zweifel das Funkenpotential bestimmt durch die Größe des Verhältnisses $\frac{V_ö}{V_g}$. Natürlich kann es auch nicht gleichgültig sein, in welcher Weise die beiden Substanzen in dem Raume zwischen den Elektroden verteilt sind. Es wäre möglich, daß bei dem Eintritt des Durchbruches die einzelnen Gasbläschen noch in dem Oel gleichmäßig verteilt sind, ebenso, wie es vor der Zersetzung das Wasser war. Andererseits könnten die Teilchen auch Zeit genug gehabt haben, um sich an die Elektroden zu begeben und dort eine große Gasblase zu bilden. Wie weit eine Entscheidung über diese Frage bereits möglich ist, soll späteren Untersuchungen überlassen bleiben.

Würden wir der Einfachheit halber uns vorstellen, das Gas wäre nach Abb. 19a gleichmäßig auf den beiden Platten verteilt, so ist die gesamte an der Platte herrschende Spannung E

gleich der Summe der am Oel liegenden Teilspannung $E_ö$ und der des Gases E_g. Es ist ferner

$$\frac{E_ö}{E_g} = \frac{k_g \cdot a_ö}{k_ö \cdot a_g},$$

worin k die Dielektrizitätskonstanten und a die Schichtstärken bedeutet.

Zunächst unbekümmert darum, was unter Einwirkung des Feldes mit dem vorhandenen Gas geschieht, wird ein vollkommener Durchschlag dann eintreten, wenn an der jetzt wasserfrei zu denkenden Oelschicht $a_ö$ die Spannung $E_ö$ auf den der Durchschlagsfestigkeit des sauberen Oeles entsprechenden Wert gestiegen ist. Und zwar ist

$$E_ö = \frac{k_g V_ö E_g}{k_ö V_g},$$

dann die Volumina $V_ö$ und V_g des Oeles und des Gases genügen der Gleichung $\frac{V_ö}{V_g} = \frac{a_ö}{a_g}$, d. h. aber, die gesamte beim Durchschlag an den Elektroden liegende Spannung ist

$$D = \frac{k_g V_ö E_g}{k_ö V_g} + E_g. \qquad (4)$$

Da die Spannung E_g cm[1]) beim Durchbruch in der unter Oel stehenden Funkenstrecke auf jeden Fall erreicht wird, so kann E_g für den ersten Faktor der Gl. 4 als annähernd konstant eingesetzt werden. Berücksichtigt man nun noch, daß eine Verteilung gemäß Abb. 27a bestimmt nicht vorliegt, so ist der erste Summand der Gleichung für D zu multiplizieren mit einem Faktor k'. Die Konstanten k_g, E_g und $k_ö$ lassen sich schließlich mit k' zu k vereinigen, und es ist

$$D = k \cdot \frac{V_ö}{V_g} + E_g/\text{cm} \cdot a_g \qquad (5)$$

Dieses Durschlagsgesetz wurde für wasserhaltiges Oel abgeleitet und kann daher nur für solches Gültigkeit bean-

[1]) E_g cm gibt die Durchschlagsfestigkeit des Gases an, so daß $E_g = E_g/\text{cm} \cdot a_g$ ist.

spruchen. Sind andere elektrolytische Beimengungen anstelle des Wassers vorhanden, so ändert sich bei gleichem prozentualen Gehalt das Verhältnis $\frac{V_ö}{V_g}$, und auch die Durchschlagsfestigkeit des entstehenden Gases wird eine andere sein, so daß E_g einen neuen der Beimengung charakteristischen Wert annimmt. Wenn auch heute, wo es gelingt, die Oele frei von Säuren und von Alkalien herzustellen, anderen Zusätzen als Wasser wenig Bedeutung zukommt, so hat doch die Gl. (5) Gültigkeit für alle elektrolytischen Beimengungen.

Nach den bisherigen Betrachtungen ist die Anwendbarkeit des Durchschlagsgesetzes (5) immerhin bedingt durch Beimengungen irgendwelcher Art. Sollte es ganz allgemein für die Durchschlagsfestigkeit des Oeles richtig sein, so dürfte man zunächst nicht danach fragen, woher das Gas vom Volumen V_g, der Dielektrizitätskonstanten k_g und der Durchschlagsfestigkeit E_g/cm kommt. Es ist eben vorhanden und bestimmt im Verein mit dem Oel, dem hier nicht der definierte, sondern der absolute Reinheitsgrad O zuzuschreiben ist, die Durchschlagsfestigkeit des vorliegenden Materials.

In der Tat sind nicht erst elektrolytische Beimengungen erforderlich, um das Vorhandensein einer Gasmenge zu bewirken. Aus den Untersuchungen von Becker[2]), über die Erhöhung der Viskosität von Oelen geht hervor, daß durch stille Entladungen gesättigten Kohlenwasserstoffen molekularer Kohlenwasserstoff entrissen wird. In dem Apparat, der zu den Versuchen in der zitierten Arbeit benutzt wurde, konnte Wasserstoffmenge von 7—10 Ltr/Kw erzeugt werden.

Es liegt nun sehr nahe, die eben geschilderte Tatsache auch auf die Durchschlagsspannung von Isolieröl zu übertragen. Bei der Einwirkung der hohen Felder, denen das Oel ausgesetzt ist, wird diesem ohne Zweifel Wasserstoff in irgendwelcher Form zwischen den Elektroden entzogen. Dieses Gas spielt dieselbe Rolle, als wenn es etwa durch Zersetzung einer elektrolytischen Beimengung entstanden wäre.

---

[2]) Wissenschaftl. Veröff. a. d. Siemens-Konzern 1926, V. Bd., 1. Heft, S. 160.

Wann eine solche Spaltung des Oeles in seine Ionen bei normalen Temperaturen eintritt, läßt sich auf Grund des vorhandenen Versuchsmaterials[3]) noch nicht sagen. Im allgemeinen werden auch noch Wasserteilchen an der Gasentwicklung beteiligt sein, und wohl fast für alle bisher bekannt gewordenen Untersuchungen ist anzunehmen, daß die beiden Erscheinungen, der Einfluß des Wassers und die Zersetzung des Oeles, ineinander greifen. Der V. 25 liefert einen weiteren Beweis dafür, daß Isolieröl durch das elektrische Feld eine chemische Veränderung erfährt. Der Rückstand, bestehend aus Kohlenstoffverbindungen, ist sichtbar, während andererseits Wasserstoff in irgendwelcher Form gebildet wird.

Die Feststellung, daß nicht nur durch elektrolytische Beimengungen Gas in dem Oel vorhanden ist, führt zu der Berechtigung, dem Gesetz (4) allgemeine Gültigkeit zuzusprechen. Wir können jetzt sagen, der Durchbruch des Oeles ist nicht nur abhängig von der ihm eigentümlichen Dielektrizitätskonstante, die es im idealgedachten Zustande haben würde, sondern das durch das Vorhandensein des elektrischen Feldes bedingte, in ihm enthaltene Gas sorgt für die Herabsetzung des idealen Funkenpotentials.

Wenn das Verhältnis $\frac{V_{\ddot{o}}}{V_g}$ und die Durchschlagsfestigkeit E_g/cm des Gases gegeben sind, ist in der Gl. (5) nur noch der Faktor k unbekannt. Wir wissen bisher nur, daß dieser Faktor in Zusammenhang steht mit der Lagerung des Gases im Oel, kurz bevor der Durchschlag erfolgt. Er wird daher nicht nur der Menge des vorhandenen Gases proportional sein, sondern wird auch in Beziehung stehen zu der Elektrodenform und deren Anordnung.

Auf Grund der Beobachtungen nach V. A 2 liegt die Vermutung nahe, daß an Spitzenelektroden bei hohen Feldern das Gas an jeder Elektrode je einen Faden bildet. Bei Plattenelektroden werden mehrere kurze Fasern entstehen, die einander parallel laufen. Es soll nicht Aufgabe dieser Arbeit sein,

[3]) Vergl. jedoch V 25.

den Faktor k für verschiedene Funkenstrecken zu bestimmen, doch werden wir seinen Verlauf für die Untersuchungen an wasserhaltigem Oel von Friese noch kennen lernen.

Durch die Betrachtungen über den Faktor k werden wir an die soviel besprochenen und in V. 2 ultramikroskopisch untersuchten Brücken erinnert. In den bisherigen Ausführungen wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß andere suspendierte Teilchen, die durch das Feld keine elektrolytische Zersetzung erfahren, nicht vorhanden seien. In Wirklichkeit sind aber stets solche Teilchen im Oel, und die Bildung von Brücken, oder Ansätzen dazu, wird den übrigen Erscheinungen parallel laufen. Um aber ihre Wirkung auf den Durchschlag zu studieren, ist es zweckmäßig, ihren Einfluß erst gesondert zu betrachten und dabei das Oel frei von in sich ionisierbaren Beimengungen anzusehen. Für höhere Spannungen soll entsprechend eine Zersetzung des Oeles selbst als nicht vorhanden gedacht werden.

Natürlich wird auch hier wieder die Dielektrizitätskonstante des Materials, aus dem sich die Brücken zusammensetzen, eine wesentliche Rolle spielen. Kommt die Durchschlagsfestigkeit der suspendierten Teilchen der des Oeles gleich, so kann höchstens infolge Oberflächenentladung zwischen den beiden Medien eine Herabsetzung des Funkenpotentiales auftreten. Friese erreichte durch sorgfältige Reinigung eine Durchschlagsspannung des Oeles von 230 KV/cm. Das Reinigungsverfahren läßt aber, wie es auch von Günther-Schulze[4]) ausgeführt wurde, darauf schließen, daß das Oel nicht frei von Fasern war. Andererseits bestimmte Friese die in Abb. 21 gezeichnete Schaulinie über die Durchbruchsspannung in Abhängigkeit von der Zahl der vorangegangenen Durchschläge.

Vergleicht man beide Versuche miteinander, so erkennt man sofort den verschiedenen Einfluß der Beimengungen. Die Rußteilchen, die sich bei den Durchschlägen bilden, haben weit größere Wirkung als Fasern, die sicherlich die angewandte Reinigungsmethode aus der Watte in das Oel gelangen ließ.

---

[4]) Ueber die dielektrische Festigkeit. Sammlg.: Lebende Bücher 1924.

Es kann aber ferner nicht gleichgültig sein, wie solche Verbindung der Elektroden mechanisch zusammengesetzt ist. Bei gleichem Material muß das Funkenpotential durch eine solche Brücke am meisten herabgesetzt werden, deren einzelne Teile fester aneinander gefügt sind. Bei lockerer Anhäufung werden noch mehr oder weniger starke Oelschichten zwischen ihnen liegen und isolierend wirken.

Für die weiteren Betrachtungen wollen wir hier unter Sättigung diejenige Menge von einem Fremdkörper verstehen, die ausreicht, bei jeder Spannung den Raum zwischen den Elektroden mit so viel Teilchen zu versehen, als er in der Lage ist, aufzunehmen. Je höher die Spannung ist, desto dichter werden sich die Partikelchen aneinander schmiegen, und die Aufnahmefähigkeit wird um so größer sein.

Ist nun das Oel mit einer bestimmten Beimengung gesättigt, und wären die Teile bei der Spannung, die der Durchschlagsfestigkeit des beigemengten Materials entspricht, so dicht gelagert, daß sie innigen Kontakt miteinander hätten, dann müßte auch die Durchschlagsfestigkeit des verunreinigten Oeles gleich derjenigen der Beimengung sein. Wir wissen aber aus den Erfahrungen an Oelschaltern, daß der durch den Lichtbogen entstandene Oelschlamm hohe Leitfähigkeit besitzt, die sich durch das Auftreten von Kriechwegen häufig bemerkbar macht. Da jedoch durch Sättigung in dem angegebenen Sinne es nicht gelingt, das Oel beliebig zu verschlechtern, so wird eine Dichtigkeit in der Lagerung der Partikel nur bis zu einem gewissen Grade erreicht. Die Funkenspannung, die durch die Bildung von Brücken herabgedrückt wird, ist also zwar proportional der Durchschlagsfestigkeit des suspendierten Materials, doch kommt sie dieser nicht gleich, auch wenn beliebige Mengen des Stoffes vorhanden sind.

Der Kurve Abb. 21 von Friese können wir entnehmen, daß die Teilchen nur sehr locker aneinander gelagert sein müssen; denn sie bestehen aus der gleichen Substanz wie der Oelschlamm mit seiner hohen Leitfähigkeit. Wenn auch das mit ihm gesättigte Oel noch immer eine Durchschlagsfestigkeit von 125 KV cm hat, verschlechtern doch die kohleartigen Stoffe,

wie sie bei dem Durchschlag gebildet werden, das Oel verhältnismäßig wenig. Es ist somit leicht erklärlich, daß der Einfluß von Beimengungen mit niedrigen Dielektrizitätskonstanten nur gering sein kann.

Als Ergebnis über die Betrachtungen von Oel, das keine zersetzbaren Beimengungen enthält, können wir nunmehr feststellen, daß die Durchschlagsfestigkeit von folgenden drei Faktoren abhängt: von dem Verhältnis $\frac{\text{Volumen des Oeles}}{\text{Volumen der Beimengung}}$, ferner von dem Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten und endlich von der Lagerung der Beimengungen in der Funkenstrecke. Diese Feststellung steht in Uebereinstimmung mit der über wasserhaltiges Oel. Trotzdem ist es aber nicht angängig, etwa das Durchschlagsgesetz (5) auch für feste Fremdkörper in Anwendung zu bringen. Der zweite Summand, der dort die Durchschlagsfestigkeit des vorhandenen Gases enthält, könnte nicht ersetzt werden durch die der festen Beimengung. Während das Gas bei der Sättigung eine homogene Verbindung zwischen den Elektroden herstellt, ist bei festen Körpern immer noch ein Gemisch von Oel und diesen Teilchen vorhanden. Unter Einsetzung desjenigen Durchschlagswertes, der diesem Gemisch von Oel und festen Partikeln entspricht, und unter Voraussetzung, daß keine elektrolytischen Beimengungen vorhanden sind, wäre es allerdings denkbar, das Gesetz (5) auch auf feste Beimengungen zu beziehen. Wie weit eine solche Analogie besteht, wird auf S. 37 besprochen.

Die drei Feinde der Durchschlagsfestigkeit des Oeles: die gaserzeugenden Beimengungen, die festen Fremdkörper und die Zersetzung des Oeles, haben wir bisher jeden für sich betrachtet, während jedoch in Wirklichkeit sie gleichzeitig auftreten. Wenn es auch möglich sein wird, das Oel vollkommen wasserfrei zu machen, so sind doch nach unseren mikroskopischen Feststellungen stets feste Teilchen vorhanden. Das Gesetz (4) müßte demgemäß eine Korrektur erfahren, die die Bildung von Brücken aus festen Bestandteilen berücksichtigt. Bedenkt man aber, daß, wie wir schon feststellten, Teilchen aus Kohle, die wohl der denkbar gefährlichste Stoff sein kann, das

Oel im ungünstigsten Falle nur bis auf 125 KV/cm zu verschlechtern vermögen, so kann der Einfluß der festen Partikel nicht erheblich sein. Da ferner nach den Durchschlagsversuchen von Friese dem Wert 125 KV/cm ein Wassergehalt von ca. 0,01 $^0/_{00}$ entsprechen würde, so kann man sagen, der Einfluß fester Teilchen ist zu vernachlässigen, sobald nur die geringsten Mengen Wasser vorhanden sind. Das Gleiche gilt auch von der Zersetzung des Oeles, die ja erst bei sehr hohen Spannungen eintritt und zum mindesten nach dem definierten Verunreinigungsgrad Null nicht unterhalb 200 KV/cm liegt.

IV. Erklärung von Versuchsergebnissen verschiedener Autoren durch die im Abschnitt III entwickelte Theorie des Durchschlags von Isolieröl.

Das einzige bisher bekannt gewordene Durchschlagsgesetz stammt von Friese[1]). Es ist die empirische Gleichung $D = \frac{1{,}1}{w} + 20$, worin w den Wassergehalt in $^0/_{00}$ angibt. Die Fig. 20 zeigt die experimentell aufgenommene Kurve D, die dieser Gleichung entspricht. Stellt man das in Abschnitt III entwickelte Gesetz $D = k \frac{V_ö}{V_g} + E_g/cm \cdot a_{g_l}^{\parallel}$ der Gleichung von Friese gegenüber, so sieht man sofort die Verwandtschaft der beiden Ausdrücke, und der innere Zusammenhang der Friese'schen Formel ist nunmehr verständlich. Der erste Summand dieser Gleichung enthält nämlich entsprechend $k \frac{V_ö}{V_g}$ die Durchschlagsfestigkeit der „wirksamen" Oelschicht, während die Zahl 20 in Verbindung zu bringen ist mit der Durchschlagsfestigkeit E_g des entwickelten Gases.

Umgekehrt macht die Friese'sche Gleichung im Anschluß an die Betrachtung im Abschnitt III, 3 eine Aussage über den Faktor k. Setzt man die beiden Formeln einander gleich, wobei aber zu beachten ist, daß entsprechend dem Durchschlagsgesetz Gleichung (5) auch in der Friese'schen Gleichung die Wasserbeimengung im Volumen- und nicht Gewichtsverhältnis einzusetzen ist. Mit dem spezifischen Gewicht des Oeles von etwa 0,9 ist somit für die Friese'sche Versuchsanordnung:

[1]) S. Anm. 1 S. 7.

$k = (\frac{1{,}1}{w} + 20 - E_g)\frac{V_g}{V_ö}$ [2]). In Fig. 20 ist k in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen und zeigt einen fast gradlinigen Verlauf. Wäre dieser Faktor konstant, so könnte man daraus schließen, daß sich das Gas in gleichmäßiger Schicht auf den Elektroden festsetzt. Würde er dagegen mit dem Wassergehalt sehr zunehmen, so wäre dies ein Zeichen dafür, daß das Zusammentreten des Gases an einer Stelle erfolgt und sich von dort aus lange ins Oel ragende Zungen bilden. Da nun k in homogenen Feldern nicht konstant ist, und andererseits mit dem Wassergehalt nur wenig[3]) wächst, so kann das Gas nicht allzu stark von Abb. 19a abweichend gelagert sein. Aus dem Versuch V. 21 mit Abb. 13 kann man schließen, daß das Gas sehr dicht nebeneinanderliegende Fasern bildet, die untereinander gleichweit in das Oel ragen.

Es ist daher verständlich, daß Oeluntersuchungen auch mit Rücksicht auf den Faktor k am einwandfreisten in Cylinderfunkenstrecken oder wenigstens mit Kugeln von großem Durchmesser angestellt werden. Bei Kugelelektroden mit kleinem Durchmesser, bei denen sich das Gas an der Stelle der größten Feldstärke ansammelt, nimmt k sehr hohe Werte an, und seine Kurve wird mit wachsendem Wassergehalt sehr steil verlaufen. Es würde, mit anderen Worten, an dieser Stelle sehr bald die Bildung einer vollkommenen Brücke zustande kommen. Zur Herstellung solcher Brücke genügt ein umso kleinerer Wassergehalt, je größer der Faktor k ist.

Der erste Summand des Durchschlagsgesetzes $(k\frac{V_ö}{V_g})$ strebt mit wachsendem Wassergehalt dem Werte Null zu. Dieser Grenzwert ist erreicht, wenn eine vollkommene Gasverbindung zwischen den Elektroden besteht, und die Durchschlagsfestigkeit E_g/cm des Gases ist damit gleich dem scheinbaren Funkenpotential des Oeles. Es erklärt sich somit das

---

[2]) k ist nur für geringen Wassergehalt bestimmt, so daß E_g vernachlässigt werden konnte.

[3]) Im Verhältnis zur fallenden Durchbruchsspannung.

Zustandekommen des von Friese gefundenen unteren Grenzwertes für die Durchbruchsspannung mit zunehmendem Wassergehalt des Oeles. Die Versuche zeigen in der Tat (V. 23 und V. 24), daß die Druchbruchsspannung des fraglichen Gases dem Friese'schen Werte von 22 KV/cm nahe kommt.

Nach den Betrachtungen in III, 3 können wir der Gleichung $D = k\frac{V_ö}{V_g} + E_g$ allgemeine Gültigkeit zusprechen, wenn wir statt V_g und E_g in diese V_s und E_s einführen, so daß V_s das Volumen irgendwelcher Fremdkörper und E_s die Durchschlagsfestigkeit bezeichnet, die die Mischung dieser Fremdkörper mit dem Oel im ungünstigsten Falle, d. h. die sie bei dem Vorhandensein einer Brücke bestimmter Dichte, erreichen kann. Auch dafür geben die Friese'schen Untersuchungen eine experimentelle Bestätigung durch die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit, bezogen auf die Anzahl der Durchschläge. Der erreichbare kleinste Wert von 125 KV/cm, dem E_s gleichzusetzen wäre, kann natürlich nicht, etwa wie E_g für zersetztes Wasser, gesondert untersucht werden.

Die von Friese aufgeworfene Frage, ob zwischen dem Werte 125 KV/cm und dem in der Praxis getrockneten Oel, das nahezu die gleiche Durchschlagsfestigkeit bsitzt, eine Beziehung besteht, läßt sich durch Gegenüberstellung der Betrachtungen III, 1 und III, 3 bejahen. Das durch Kochen und Filtern gereinigte Oel enthält durch die ihm zugemuteten Lichtbogen (oder auch, für Transformatoren, durch nach Abschnitt III, 2 geschilderte Zersetzung) auf jeden Fall so viel submikroskopische und größere Kohleteilchen, daß die Funkenstrecke im Sinne des Abschnittes III, 3 mit ihnen gesättigt ist, das Oel auch hier etwa von der Durchschlagsfestigkeit 125 KV/cm sein muß. (Vergl. V. 7.)

Des Weiteren ergibt sich, daß man das in der Praxis getrocknetes Oel, zum mindesten nach dem in der Einleitung definierten Reinheitsgrade Null, als wasserfrei bezeichnen kann. Würde sich nämlich bei den Durchschlägen Wasser in dem Oel bilden, so würde etwa die Kurve Abb. 21 von Friese dem Werte 22 KV/cm zustreben.

Oelschläger[4]) machte unter dem Mikroskop interessante Beobachtungen an feuchtem Oel. Er bemerkte, daß aus Fasern Bläschen ausgetrieben wurden, die allerdings nach dem Abschnitt III nicht aus Wasserdampf, sondern aus Knallgas bestanden haben.

Auf Grund der ultramikroskopischen Feststellungen gilt es zunächst der bisherigen Anschauung über „feuchte Fasern" entgegenzutreten. Man nimmt an, es befinden sich in dem Oel Fasern aus hygroskopischem Material, die die Feuchtigkeit in sich aufsaugen. In sehr gutem Oel sind aber Teilchen von langgestreckter Form auch ultramikroskopisch kaum zu beobachten. Die Fasern entstehen erst unter dem Einfluß des Feldes, wie es in dem V. 2 beschrieben ist. Bei ihrem Aufbau werden feste und Wasserteilchen aneinandergefügt (Abb. 11), die nicht voneinander reißen, auch wenn sie nicht mehr dem Felde ausgesetzt sind. Die so entstandenen Fasern sind es, die in dem Oel schwimmen und unter dem Mikroskop sichtbar werden, wobei natürlich angenommen wird, daß nicht etwa Fasern durch Filtrierpapier oder dergl. in das Oel gelangt sind. Will man also von feuchten und trockenen Fasern sprechen, so kann dies nur in dem Sinne geschehen, als man sich die trockenen aus nur festen Teilen zusammengesetzt denkt, während in den feuchten unzersetzte Wasserteilchen an dem Aufbau mit beteiligt sind. Wenn auch ferner die festen Teilchen aus hygroskopischem Material bestehen, so werden sie in der Regel kein Wasser in sich aufnehmen können, da sie nur selten in ausreichende Berührung mit Wasserteilchen kommen. Die Fasern sind nämlich, außer aus diesen festen Teilchen und Wasser, auch noch aus solchen von niedrigeren Dielektrizitätskonstanten als der des Oeles zusammengesetzt. Es sind dies Oelteilchen, die in ihrer molekularen Struktur von der Hauptmasse des Oeles abweichen. Ueber die Beteiligung solcher Partikelchen an der Faserbildung kann auch das Ultramikroskop nichts aussagen, aber in den Betrachtungen über den Faktor k[5]) ist dies Erfordernis bereits enthalten. Entspräche eine

[4]) Siemenszeitschrift 1925, Heft 1, S. 29.
[5]) Abschn. III, 3.

solche Zusammensetzung der Fasern nicht der Wirklichkeit, sondern wären feste und Wasserteilchen so dicht aneinander gelagert, daß die festen Teilchen Wasser in sich aufnehmen könnten, so würden unter anderem, z. B. in den Versuchen von Oelschläger, nicht erst bei 45 KV/cm leichte Ueberschläge eingetreten sein.

Das von Oelschläger beobachtete bläuliche Leuchten längs der Fasern und das von ihm gleichzeitig gehörte leichte Knacken, sind durch die gewonnenen Anschauungen über die Zusammensetzung von Brücken erklärlich. Die in den Fasern befindlichen Wasserteilchen waren bereits ganz oder zum Teil durch das elektrische Feld in ihre Bestandteile zerlegt, und die Lichterscheinungen sind auf Glimmentladungen innerhalb der Bläschen zurückzuführen. Ein Knacken tritt ein, wenn in einer größeren Blase die Zündtemperatur des Gasgemisches erreicht ist. Dabei soll dahingestellt sein, ob Durchschlagsfestigkeit und Zündtemperatur einander entsprechen, d. h. ob erst ein vollkommener Funkenübergang erforderlich ist, um das Knallgas zu entzünden. Die eben beschriebenen Explosionserscheinungen sowie die Glimmentladungen mit blauer Farbe im Knallgas, lassen sich auch experimentell in größerem Maßstabe zeigen.

Aus dem Abschnitt III geht hervor, wie die Durchbruchsspannung des Oeles in bestimmter Weise von Gas, das aus Wasser entwickelt wird, oder durch Dissoziation des Oeles selbst entsteht. Nach Abb. 19 wird in dem Oel enthaltenes Wasser bis zur fast vollkommenen Zersetzung etwa t Sek. brauchen, unter der Annahme einer konstanten Feldstärke während dieser Zeit und einer Wasserteilchengröße vom Durchmesser d. Wird die Bedingung $\frac{V_{ö}}{V_g} = \frac{1}{k}(D - E_g)$ für das Funkenpotential schon vor Ablauf der t Sek. erreicht, so ist im Sinne der im Abschnitt III gewonnenen Anschauungen nicht alles in dem Oel vorhandene Wasser am Durchschlag beteiligt. Mit anderen Worten: es wird die entstehende Gasmenge und somit auch die Durchbruchsspannung innerhalb des Zeitintervalles vom Beginn bis zur vollkommenen Zersetzung proportional sein dem Effektivwert der Spannung.

Da der Effektivwert einer Wechselspannung eine Funktion der Kurvenformen und der Periodenzahl ist, erklärt sich somit die von Draeger festgestellte Abhängigkeit des Funkenpotentials von Kurvenform und Periodenzahl.

Derselben Wirkung ist auch der Unterschied der Durchschlagsfestigkeit bei Gleich- und Wechselstrom zuzuschreiben.

Da der Durchbruch nicht nur von der Größe des Feldes, sondern auch von der Zeit seiner Einwirkung abhängig ist, wird ferner die Erzielung sehr hoher Funkenpotentiale durch plötzliches Einschalten verständlich.

Charakterisiert wird ein Oel im Verein mit seinen elektrolytischen Bestandteilen nur durch den Durchschlagswert, der nach der fraglichen Zersetzung bestimmt wird. Es ist daher z. B. möglich, daß ein stark wasserhaltiges Oel, das einer bestimmten Spannung nur 1 Sek. ausgesetzt war, mit einem geringeren Gasgehalt eine größere Festigkeit zeigt, als Oel mit nur wenig Wasser, das aber 5 Sek. an der gleichen Spannung gelegen hat und daher vielleicht über einen größeren Gasgehalt verfügen kann. Ist die Zeit stets ausreichend, um alles Wasser in Gas zu verwandeln, so ist das Funkenpotential nur noch dem Wassergehalt proportional. Wie groß die Zersetzungszeiten in Wirklichkeit sind, läßt sich nicht sagen. Die zu erwartende starke Abhängigkeit der Durchbruchsspannungen bei Periodenzahlen unter etwa 30 Perioden könnte darüber nähere Auskunft geben. Da mit so kleinen Frequenzen wenig Versuchswerte vorliegen, ist in diesen Betrachtungen eine neue Richtung für weitere Oeluntersuchungen enthalten.

Ueber die bisher noch recht ungeklärte Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von der Temperatur gibt die Abb. 22 einige Auskunft. Leider ist wenig darüber bekannt, wie das Wasser in das Oel gelangt und von welchen Faktoren die hygroskopischen Eigenschaften abhängen. Friese stellte fest, daß der Wassergehalt im Oel dem seiner Umgebung proportional ist. Es gelangt also nicht nur Wasser in das Oel, sondern wird auch abgegeben, wenn der Wassergehalt der umgebenden Luft geringer ist. Diese Tatsache gestattet wohl die Annahme, daß der jeweilige Gehalt an Wasser auch ab-

hängig ist von der Temperatur und zwar derart, daß er umso größer wird, je geringer die Temperatur ist. Nach den obigen Betrachtungen über den Durchschlag muß daher mit wachsender Temperatur die Durchschlagsfestigkeit steigen. Das Gesetz könnte wohl etwa durch Kurve 1 Abb. 22 wiedergegeben werden. Das Funkenpotential würde solange zunehmen, bis alles Wasser verdrängt ist. Jedoch kommt dazu noch ein weiterer Einfluß durch die Zersetzung des Oeles, die nach V. 25 etwa den Charakter 2 Abb. 22 trägt. Nach den Frieseschen Untersuchungen macht sich dieser Einfluß der Zersetzung von etwa 60° C an besonders bemerkbar, weshalb der Schnittpunkt der Kurven 1 und 2 etwa bei dieser Temperatur liegen wird. Während Kurve 2 erfahrungsgemäß von einem sehr hohen, aber doch vielleicht von dem betreffenden Oel charakteristischen Wert ausgeht, entspricht der Beginn der Kurve 1 z. B. bei Null Grad dem dieser Temperatur zuzuschreibenden Wassergehalt. Mit wachsender Temperatur wird Kurve 1 bis zu einem konstanten Grenzwert fallen, der der Durchschlagsfestigkeit von Oeldämpfen gleich sein muß, wogegen dem wasserfreien Oel zukommende Werte (Kurve 2) einem bestimmten Höchstwert zustreben. Die Vereinigung der Kurven a und b erklärt also das Verhalten der Durchschlagsspannung des Oeles bei steigender Temperatur und das Zustandekommen der Friese'schen Kurve.

Günther-Schulze[6]) erkannte, daß bei dem Durchbruch von Flüssigkeiten eine verschleierte Gasentladung stattfindet, und er schreibt die Entstehung des an dem Durchbruch beteiligten Gases einer Ionenreibung zu. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes gelangen in dem Oel befindliche Ionen in Bewegung, und ihre Geschwindigkeit wird so groß, daß sich durch Erwärmung Dampfbahnen bilden. Nach dem Abschnitt III, 1 sind nun in der Tat Gase an den Vorgängen beim Durchschlag beteiligt; aber schon der Versuch 22 zeigt, daß bei wasserhaltigem Oel bereits in Feldern von geringer Stärke Gas in dem Oel vorhanden ist. Nach V. 27 trägt auch bei

[6]) Siehe Anmerkung S. 31.

genügend hoher Spannung das Oel selbst durch Ionisierung für das Vorhandensein eines gasförmigen Körpers Sorge. Es ist also nicht mehr erforderlich, die Ursache einer Gasentwicklung etwa in der Ionenreibung zu suchen.

Während Günther-Schulze seine Hypothese ohne eigene Versuche aufstellte, prüfte Draeger diese Anschauungen experimentell. Er fand, daß seine Versuchsergebnisse von der Hypothese Günther-Schulze's in einigen Punkten abwichen. Wenn Draeger trotzdem an der Anschauung festhielt, daß durch Ionenreibung entstehende Gaskanäle für den Durchschlag verantwortlich sind, so ist dies wohl nur darauf zurückzuführen, daß eine Reihe von Versuchsergebnissen sich zufällig durch die genannte Hypothese erklären lassen.

V. Ausblick auf die praktische Bedeutung der vorstehenden Versuche und die daraus entwickelten theoretischen Vorstellungen gemäß Abschnitt III.

Während bisher theoretische Gesichtspunkte in den Vordergrund getreten sind, ergeben sich aus den Abschnitten II und III eine Anzahl Folgerungen, die für den Gebrauch des Oeles im Betriebe von Bedeutung sind.

Eine Reihe Schalterexplosionen in dem vergangenen Jahrzehnt ist auf die Bildung von brennbaren Gasen beim Abschalten zurückzuführen. Die Gase sammeln sich unter dem Schalterdeckel und vermischen sich dort mit Luft, um bei Erreichung der Zündtemperatur etwa durch Glimmentladungen zur Detonation gebracht zu werden. Diesen Schalterexplosionen ist man durch geeignete Konstruktionen und vor allen Dingen durch Abführen der Oelgase ins Freie mit Erfolg entgegengetreten. In den letzten Jahren haben aber neue Schalterexlosionen, deren Ursache zum großen Teil Schutzwiderständen zugeschrieben wurde, zu heftigen Diskussionen Veranlassung gegeben. Es wird sogar vielfach angestrebt, die Unterbringung von Widerständen im Schalterkessel zu vermeiden, da man durch irgend eine vielleicht plötzliche Ueberlastung befürchtet, es wird Oel verdampft und durch den glühenden Draht zur Explosion gebracht. Diese und ähnliche Vorstellungen über derartige Explosionen entsprechen auf Grund der Feststellungen im Abschnitt III, 1 wohl kaum der Wirklichkeit und sind einer anderen Ursache zuzuschreiben.

Das in dem Schalter befindliche Oel hat stets einen gewissen Gehalt an Wasser, und wir wissen, daß dieses schon bei verhältnismäßig geringen Feldern in seine Bestandteile zersetzt wird. Wenn das entwickelte Gas Gelegenheit und Zeit hat, sich an bestimmten Stellen festzusetzen und zu sammeln,

und wenn schließlich die Gasblase Glimmentladungen ausgesetzt ist, kann das Zustandekommen einer Explosion durch das Knallgas nicht verwunderlich sein. Die genannten Bedingungen für das Eintreten einer solchen Störung sind aber gerade bei vielen Konstruktionen von Schutzwiderständen vorhanden. Im kleinen läßt sich eine solche Explosion vorführen, indem man in wasserhaltiges Oel etwa zwei zylinderförmige parallele Elektroden einführt und an ihnen unter Oel ein Stück Isolierpapier anbringt, unter dem sich das Gas ansammeln kann. Je nach dem Wassergehalt und der Größe des Feldes tritt nach Stunden oder Tagen eine kleine Explosion ein.

Es ist also von größter Wichtigkeit, Schutzwiderstände, überhaupt alle unter Oel liegenden Teile möglichst so zu konstruieren, daß aufsteigende Blasen mit Sicherheit nach oben entweichen können.

Der Versuch 27 zeigt, daß mit Rücksicht auf die Zersetzung des Oeles im elektrischen Feld die Temperatur so niedrig als möglich zu halten ist. Bei Transformatoren wird die Zersetzung besonders stark sein, da eine große Fläche der Wickelung mit dem Oel in Berührung kommt. Unter Beachtung dieser Erscheinung ist es zweckmäßig, dafür zu sorgen, daß die vom V. D. E. vorgeschriebene Temperatur von 60° C nicht erreicht wird. Auf Grund chemischer Untersuchungen[1]) findet durch Sauerstoffaufnahme aus der Luft ein Altern des Oeles statt; doch kann diese Zersetzungserscheinung, verglichen mit der durch das elektrische Feld bei erhöhten Temperaturen, nur gering sein. Wollte man daher für angelieferte Oele ein relatives Maß ihrer Lebensdauer bestimmen, so müßte man darauf ausgehen, die Stärke der Zersetzung in gleichen Feldern und bei gleicher Temperatur etwa bei 90° C zu ermitteln.

In Oelschaltern ist die Zersetzung durch das Feld zu vernachlässigen gegen die durch den Lichtbogen. Es sind nur kleine Oelmengen starken Feldern ausgesetzt, während eine

[1]) Wissenschaftl. Veröffentl. a. d. Siemenskonzern 1926, Bd. 5, Heft 2, S. 211.

der Energie des Lichtbogens proportionale, unvergleichlich stärkere Verkohlung des Oeles bei jeder einzelnen Abschaltung unvermeidlich ist. Soweit nicht die Vorwärmung des Oeles ungünstigen Einfluß auf den Lichtbogen ausübt, ist es daher im Gegensatz zu Transformatoren nicht falsch, die Temperatur des Oeles möglichst hoch, also etwa auf 60° C zu halten; denn je höher die Temperatur, desto geringer ist die Aufnahmefähigkeit von Wasser, und damit die Durchschlagsfestigkeit umso größer.

Die Versuche 2 und 28 zeigen das Zustandekommen des Oelschlammes, und wie er aus großen und kleinen bis submikroskopischen Teilen gebildet wird und sich auffassen läßt, als ein physikalisches Gemisch von kohleartigen Verbindungen, Wasser und von nur wenig zersetztem Oel. Die Bildung des Oelschlammes erfolgt zum größten Teil an den Elektroden (Abb. 27), aber auch im freien Raum schwebende Teilchen V. 5 ballen sich zusammen. Die Schlammbildung ist als Selbstreinigung zu begrüßen, und wo es möglich ist, sollte sie künstlich vergrößert werden, zumal an den spannungführenden Teilen Wasserpartikelchen zersetzt werden und wohl zum größten Teil nach oben entweichen. Bei Oelschaltern wird die Erschütterung beim Ausschalten zusammen mit dem Verschwinden des Feldes genügen, die gebildeten Schlammteilchen zu Boden fallen zu lassen. Anders steht es bei Transformatoren, bei denen solche Gebilde in nächster Umgebung der Wicklung, oder an dieser selbst, ungestört haften bleiben. Da ja die Schlammbildung nach V. 6 in erster Linie durch Polarisation hervorgerufenen Kräften zuzuschreiben ist, wäre es äußerst erwünscht, in Transformatorenkesseln Elektroden in bestimmter Entfernung von den Wicklungen anzubringen, die das Ansammeln von Schlamm an den Spulen selbst herabsetzen.

Eine Tatsache, die besonders in Oelschaltern zu mannigfachen Störungen führt, ist die, daß sich gerade an Isoliermaterialien, besonders an Hartpapier, mit Vorliebe Schlamm absetzt. Die Erklärung für diese Erscheinung ist in den V. 3 und V. 6 enthalten. Während polarisierte Teilchen angezogen werden, erfahren an den Elektroden aufgeladene eine Abstoßung. Nach der Abstoßung fallen die Schlammteile zu

Boden, soweit nicht neue durch Polarisation entstandene Kräfte die Schwerkraft überwinden. Da aber an dem größeren Durchmesser der Isolierrohre eine geringere Feldstärke herrscht als an den spannungführenden Teilen, sind an den Isolatoren die stoßenden Kräfte geringer, so daß an ihnen der Schlamm besser haften kann. Man begegnet im Betriebe dieser Erscheinung durch gründliche Reinigung der unter Oel liegenden Isolierteile, wozu hier hinzugefügt sei, daß sie nötiger ist, als die Reinigung des Oeles selbst, und öfter als diese erfolgen sollte.

Die Feststellungen nach V. 26 lassen sich einigermaßen auf Oelschalter übertragen und geben allerdings nur angenähert an, mit welcher Geschwindigkeit die Schlammbildung vor sich geht und das Oel von größeren Fremdkörpern befreit wird, soweit keine Temperaturströmungen vorhanden sind.

Die Reinigungsverfahren, die sich in der Technik eingeführt haben, sind das Filtrieren, das Kochen und das Centrifugieren. Da nach Abschnitt III, 3 feste Verunreinigungen die Durchschlagsfestigkeit nur wenig beeinflussen, so ist vor allen Dingen für eine Befreiung von Wasser Sorge zu tragen, was am sichersten durch längeres Erhitzen auf etwa 110^0 C geschieht. Die Entfernung fester Bestandteile macht sich im wesentlichen nur dann erforderlich, wenn Gefahr zur Entstehung von Kriechwegen in dem betreffenden Apparat besteht. Zur Beseitigung der festen Körper dient das Filtrieren und Centrifugieren. Das Filtrieren ist dem Centrifugieren vorzuziehen, da es gleichzeitig für die Entfernung von Wasser sorgt, während das vom Centrifugieren nicht mit Sicherheit gesagt werden kann. Es besteht nämlich die Möglichkeit, daß sich das Wasser in Form von Knallgaskugeln in dem Oel befindet. Alleiniges Filtrieren oder Centrifugieren, ohne das Oel außerdem einer Erwärmung zu unterziehen, kann nicht als vollwertige Reinigung angesehen werden. Schließlich ist dem Filtrieren und Centrifugieren eine Grenze gesetzt, da nur Teilchen bis zu einer gewissen Größe entfernt werden können.

Nach den Versuchen V. 25 und V. 26 ist den genannten Reinigungsmethoden die elektrische Reinigung, und zwar unter

gleichzeitiger Erwärmung auf ca. 90° C, vorzuziehen; jedoch kommt diese Reinigungsmethode nur für kleine Oelmengen in Frage, da sie zuviel Zeit erfordert. Wo es sich darum handelt, die Beschaffenheit eines Oeles selbst, das verunreinigt ist, zu prüfen, sollte nur die elektrolytische Reinigung bei erhöhter Temperatur angewendet werden. Feste Teilchen bis zu den Submikronen werden dem Oel in erheblichem Maße entzogen, und Wasser ballt sich zusammen, um in Form kleiner Gasbläschen zu entweichen. Nach Ablauf einer gewissen Zeit läßt sich das gereinigte Oel mit dem Stechheber entnehmen.

Die Brauchbarkeit des Oeles wird zahlenmäßig bisher nur durch die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit festgestellt. Es hat sich im Laufe der Jahre durch die Erfahrung als Elektrodenform zu diesen Untersuchungen die Kugelkalotte als zweckmäßig erwiesen. Der theoretische Grund hierfür ist in dem Abschnitt III enthalten.

Der Abschnitt IV zeigt aber, daß das Funkenpotential von einer Reihe Faktoren abhängt, die bei den üblichen Untersuchungen zum Teil unbeachtet bleiben, so daß die Durchschlagsprüfungen stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet bleiben werden. Ob die durch die Versuche 10 und 18 charakterisierten Erscheinungen an die Stelle der Durchschlagsversuche treten können, muß erst die Erfahrung zeigen. Jedenfalls wird sich eine entsprechende Apparatur zunächst neben der Funkenstrecke für größere Zentralen sehr gut verlohnen.

An dem Ultramikroskop müßten zu diesem Zwecke einheitliche Elektroden angebracht sein, für die das Instrument bei bestimmten Elektrodenabständen und Spannungen mittels Oel von bekannten Eigenschaften zu eichen wäre. Während nach V. 11 in dem Gesichtsfeld des Mikroskops eine Skala erforderlich ist, macht sich zu den Erscheinungen V. 10 eine Stoppuhr notwendig.

In Abb. 9 finden wir rechts die Meßwerte des V. 10 in Abhängigkeit von der Umpolzeit aufgetragen und erkennen, daß in dieser Versuchsanordnung bei gleichen Umpolzeiten für gekochtes Oel 40 Volt erforderlich sind, um nahezu dieselbe Revolution in der Bewegung hervorzurufen wie 30 Volt für angeliefertes Oel. Durch die Zersetzung des Oeles beim

Kochen hat sich die Zahl der Submikronen vermehrt, was sich hier in der Verstärkung der Erscheinungen V. 7 bis V. 11 und sonst durch Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit kund gibt.

Aus den Kurven der Abb. 9 sind, soweit keine Meßwerte eingezeichnet sind, die der Abb. 23 konstruiert, und man sieht, wie weit bei gleichen Spannungen und Umpolzeiten die Dauer der Revolution bei beiden Oelsorten verschieden ist.

Feuchtes Oel zeigt auch eine seinem Wassergehalt entsprechende Revolutionsdauer (V. 13). Die Erscheinungen für trockenes Oel V. 7 bis V. 11 einerseits und für feuchtes V. 12 bis 18 andererseits greifen ineinander über. Oel, bei dem der Wassergehalt auch hinsichtlich der Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit vorherrscht, könnte nach V. 18 geprüft werden. Abb. 12 zeigt eine Eichkurve der verwendeten Apparatur, die naturgemäß noch mit vielen Unsicherheiten behaftet ist.

VI. Zusammenfassung.

1. Ueber die inneren Vorgänge beim Durchschlag flüssiger Isolatoren werden Betrachtungen aufgestellt, wonach die Höhe des Funkenpotentials durch das Vorhandensein von Gasen bedingt wird. (Abschnitt III.)

2. Die dielektrische Flüssigkeit wird durch das elektrische Feld zersetzt. Die hierbei entstehenden Gase bestimmen die scheinbare Durchschlagsfestigkeit des Oeles. (S. 29.)

3. Elektrolytisch zersetzbare Verunreinigungen erfahren ebenso eine Zersetzung. Insbesondere setzen Wasserbeimengungen im Isolieröl nicht als solche das Funkenpotential herab. Es entsteht vor Eintritt des Durchbruches Knallgas, das mit dem Oel — im Sinne von 1 und 2 — ein zusammengesetztes Dielektrikum bildet. (S. 27.)

4. Das Durchschlagsgesetz für wasserhaltiges Oel lautet: $D = k\frac{V_ö}{V_g} + E_g/cm\, a_g$, worin k neben Materialkonstanten die Art der Lagerung des entwickelten Gases vom Volumen V_g und der Durchschlagsfestigkeit E_g/cm bestimmt, und a_g die Stärke der wirksamen Gasschicht angibt.

Dieses Durchschlagsgesetz erklärt den inneren Zusammenhang der von Friese gefundenen empirischen Formel: $D = \frac{1{,}1}{w} + 20$, worin w der Wassergehalt in $^0/_{00}$ ist. (S. 28 und 39.)

5. Feste unzersetzbare Verunreinigungen wirken, wenn sie leitend sind, etwa wie eine Verkürzung des Elektrodenabstandes. Allgemein hängt die Durchschlagsfestigkeit, außer von Materialkonstanten von dem Volumenverhältnis $\frac{V_ö}{V_g}$ der beiden Dielektrika Oel und Fremdkörper und der Art ihrer Lagerung ab. (S. 30.)

6. Die Lagerung von Fremdkörpern zwischen den Elektroden verändert sich in homogenen und gleichmäßig divergenten Feldern mit dem Volumen derselben nach einem einfachen Gesetz. (S. 31.)

7. Die Tatsache, daß Oel durch Wasser nicht beliebig zu verschlechtern ist, ist eine Folge der Zersetzung. Die Durchschlagsfestigkeit des entstehenden Gases gibt den unteren Grenzwert an. (S. 32.)

8. Das Funkenpotential ist von der Schnelligkeit der Spannungssteigerung abhängig; denn je langsamer sie erfolgt, desto mehr Gas, bzw. auch feste Körper, können sich zwischen den Elektroden bilden und ansammeln. Aus dem gleichen Grunde erklärt sich das Erreichen hoher Durchbruchsspannungen durch plötzliches Einschalten, und schließlich auch die Abhängigkeit der Durchbruchsspannung von der Kurvenform und der Periodenzahl, die sämtlich als Verzögerung der Gasentwicklung aufzufassen sind. (S. 40.)

9. Da die Herstellung des wirksamen, zusammengesetzten Dielektrikums vom Effektivwert abhängt, ist nicht allein der Scheitelwert, sondern auch der Effektivwert der Spannung für den Durchbruch verantwortlich. (S. 40.)

10. Das in der Technik durch Kochen getrocknete Oel ist als praktisch wasserfrei zu bezeichnen. Es besteht eine Beziehung zwischen seiner Durchschlagsfestigkeit und der von solchem Oel, das durch feste leitende Teilchen verunreinigt ist, wodurch die von Friese ausgesprochene Vermutung bestätigt wird. (S. 37.)

11. Von feuchten Fasern in Oel kann im Gegensatz zu den bisherigen Anschauungen im allgemeinen nur insofern die Rede sein, als bei ihrer Bildung neben festen auch Wasserteilchen beteiligt sind. (S. 38.)

12. Die von Oelschläger unter dem Mikroskop angestellten Beobachtungen an feuchtem Oel erklären sich durch die Entstehung des Knallgases. (S. 39.)

13. Feste suspendierte Teilchen haben, im Verhältnis zu Wasserbeimengungen, nur geringen Einfluß. Auch für feste, unzersetzbare Beimengungen existiert für die Durchschlags-

festigkeit ein unterer Grenzwert, der bedingt ist durch die Dielektrizitätskonstante des Mischkörpers und durch die mehr oder weniger dichte Lagerung der fremden Teile zwischen den Elektroden. (S. 32.) — Für kohleartige Verunreinigungen nach Friese 125 KV/cm. (S. 37.)

14. Die Stärke der Oelzersetzung nimmt mit der Temperatur zu, so daß die Durchbruchsspannung der letzteren umgekehrt proportional ist.

Dies und die Annahme, daß der Wassergehalt mit der Temperatur abnimmt, erklärt den Charakter der von Friese angegebenen Abhängigkeit des Funkenpotentials von der Temperatur. (S. 41.)

15. Der Zersetzung des Wassers im Oel ist eine bisher nicht erkannte Art von Schalterexplosionen zuzuschreiben. (S. 43.)

16. Für das Altern des Oeles ist in erster Linie die Ionenspaltung durch das elektrische Feld verantwortlich. (S. 29.)

17. Durch Aufladung beim Berühren der Elektroden bewegte Submikronen lassen sich in kleinen Feldern von denen unterscheiden, die infolge von Polarisation angetrieben werden.

Die ultramikroskopische Unterscheidung von Oelproben mit ungleichartigen suspendierten Teilchen, ohne Verwendung der Bewegungserscheinungen im elektrischen Feld, ist sehr unsicher.

Die Geschwindigkeit der aufgeladenen Teilchen ist größer als die der polarisierten und läßt sich bereits bei einer Feldstärke von kleiner als 0,3 KV/cm verfolgen. Nach Berührung mit einer Elektrode folgt ein Teilchen anfangs etwa den Kraftlinien, verliert aber sehr bald seine Ladung und folgt dann wieder den Kräften, die durch Polarisation hervorgerufen werden. Die Geschwindigkeit der abgestoßenen Teilchen kurz nach der Aufladung läßt sich bestimmen und beträgt für ein KV/cm Feldstärke etwa 10 cm/Sek. (S. 11—14.)

18. In wasserhaltigem Oel überwiegen die durch Aufladung verursachten Kräfte vom positiven zum negativen Pol. Die Geschwindigkeit einzelner Teilchen ist dabei kleiner als bei trockenem Oel.

Die mehr oder weniger starke Zurücksetzung der durch Polarisation bedingten Kräfte ist ein Maß für den Wassergehalt des Oeles. Beim hohen Wassergehalt werden diese Kräfte vollkommen unterdrückt; die Teilchen haben alle gleiche Geschwindigkeit in einer Richtung. Es findet anscheinend eine Flüssigkeitsbewegung statt. (S. 16 und 47.)

19. Wechselt das Feld die Richtung, so erhalten die durch Polarisation in die Umgebung der Elektroden gebrachten Teilchen eine Abstoßung durch Aufladung. Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Dauer der Abstoßung ein Maß für die Anzahl fremder Teilchen. (S. 14 und 47.)

20. Der Oelschlamm ist aufzufassen als ein physikalisches Gemenge von kohleartigen Teilchen, Wasser und Oel, das andere molekulare Zusammensetzung als die der Hauptmasse besitzt. (S. 45.)

Das Absetzen von Oelschlamm erfolgt besonders an Isolierteilchen deshalb, weil dort die durch Aufladung verursachte Abstoßung geringer ist als an den Elektroden selbst. (S. 45.)

21. Eine elektrische Reinigung des Oeles wäre theoretisch die einwandfreieste. Für die Technik am wichtigsten ist das Erhitzen des Oeles, während Filtrieren und Centrifugieren von untergeordneter Bedeutung sind, sofern nicht abgesetzter Schlamm in dem Apparat durch irgendwelche Bewegung aufgewirbelt wird und zur Bildung von Kriechwegen führen kann. (S. 46.)

Zum Schluß sei es mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. K. Schmidt, für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für die liebenswürdige Beratung bei ihrer Ausführung meinen ergebensten Dank auszusprechen.

VII. Literaturübersicht.

Becker: Ueber die Erhöhung der Viskosität von Oelen unter dem Einfluß der stillen Entladung. Wissenschaftl. Veröff. a. d. Siemenskonzern 1926, Bd. 5, H. 1, S. 160.

Draeger: Ueber die Leitfähigkeit und die dielektrische Festigkeit von Transformatorenöl. Archiv f. Elektrotechn. 1924, S. 366.

Engelhardt: Zur Messung der dielektrischen Festigkeit von Isolierölen. Archiv f. Elektrotechn. 1924, S. 181.

Evers u. Schmidt: Die künstliche Alterung von Mineralölen. Wissenschaftliche Veröff. a. d. Siemenskonzern 1926, Bd. 5, H. 2, S. 211.

Friese: Ueber Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. Wissenschaftl. Veröff. a. d. Siemenskonzern 1921, Bd. 1, H. 2, S. 41.

Günther-Schulze: Ueber die dielektrische Festigkeit. Sammlg.: Lebende Bücher 1924.

Heyden u. Typke: Raffinationsversuche auf Verteerungszahl an einem amerikanischen Spindelöldestillat. Elektrotechn. Zeitschrift 1925, S. 1734.

Heyden u. Typke: Die Behandlung mit Fullererde, eine einfache Methode zur Reinigung gebrauchter Oele. Elektrotechn. Zeitschr. 1925, S. 1518.

Oelschläger: Mikroskopische Beobachtung von Oeldurchschlägen. Siemens-Zeitschrift 1925, H. 1.

Schröter: Reinigung und Durchschlagsfestigkeit von Transformatorenöl. Archiv f. Elektrotechn. 1923, S. 67.

Schumann: Ueber Versuche zur Natur des elektrischen Durchschlages. Zeitschr. f. techn. Physik 1925, Bd. VI, S. 439.

Sorge: Ueber die elektrische Festigkeit einiger flüssiger Dielektrika. Archiv f. Elektrotechn. 1924, S. 189.

Stäger: Ueber das Verhalten von Transformatorenölen in der Wärme. Elektrotechn. Zeitschrift 1923, S. 73.

Stern: Transformatoren und Schalteröle. Elektrotechn. Zeitschrift 1922, S. 140 u. 453.

Wenke: Oelschalterdefekte durch Schlammablagerung und deren Meldung. Elektrotechn. Zeitschrift 1926, S. 183.

Zimmermann: Ueber die Durchschlagsfestigkeit an Isolierölen. Archiv f. Elektrotechn. 1925, S. 271.

Außer den vorstehenden Literaturangaben wurde eine Reihe von Veröffentlichungen berücksichtigt.

Abb. 2

Abb. 3

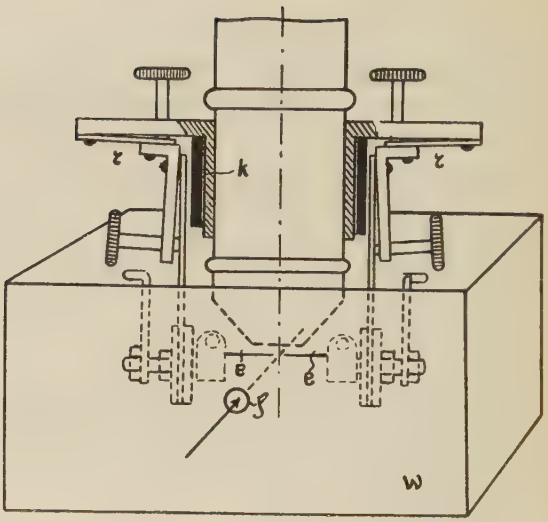


Abb. 1

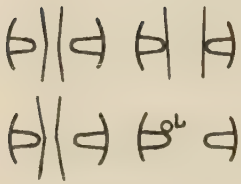


Abb. 4

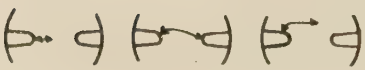


Abb. 6

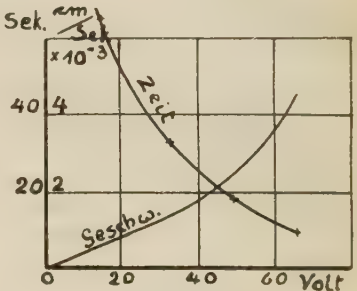


Abb. 5

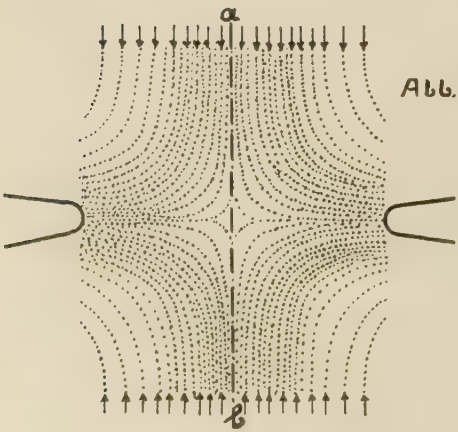
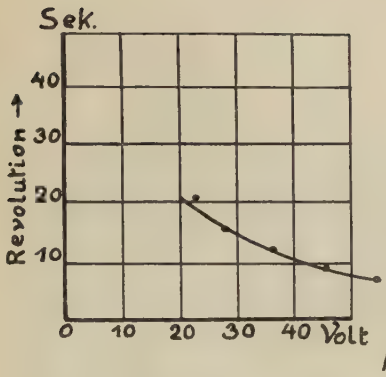


Abb. 7

Abb. 8



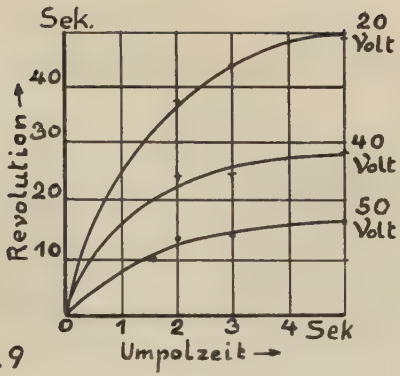


Abb. 9

Abb. 10

Abb. 11

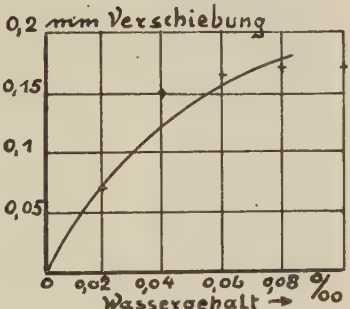


Abb. 12

Abb. 13

Abb 14

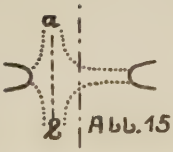


Abb. 15

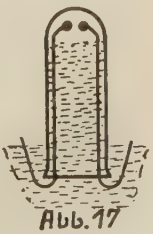


Abb. 17

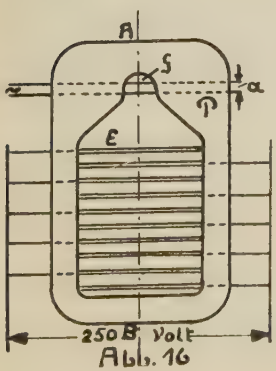


Abb. 16

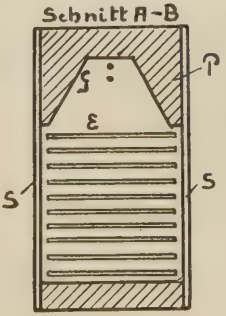


Abb. 16 a

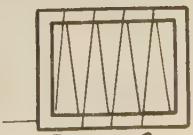


Abb. 16 B.

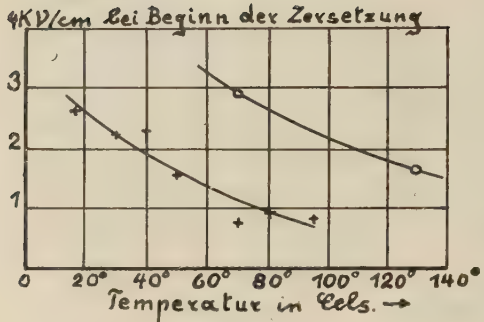


Abb. 18

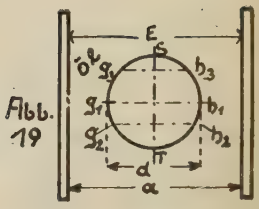


Abb. 19

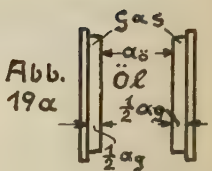
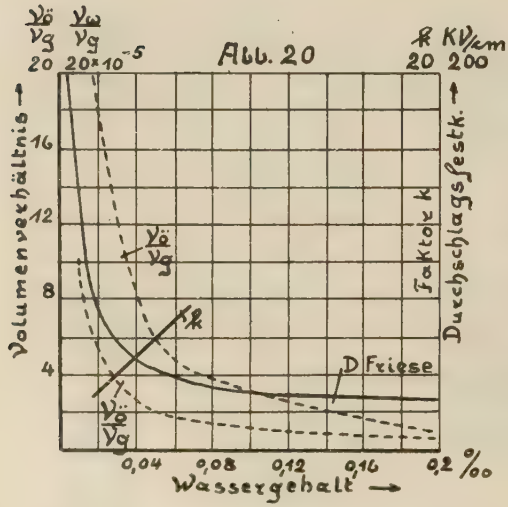


Abb. 19a



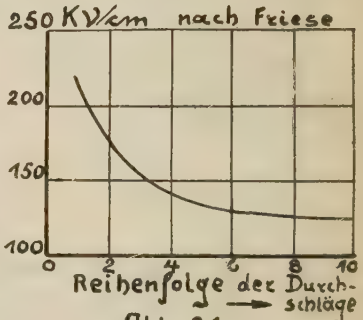


Abb. 21

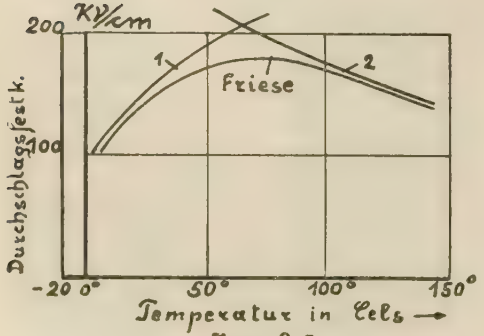


Abb. 22

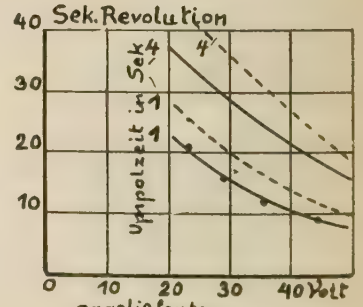


Abb. 23

a vor dem Einschalten

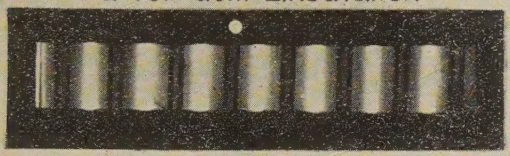
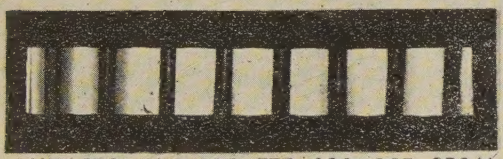


Abb. 27.



115 230 345 460 575 690 805 920 Volt
b nach 12 Std.

a vor dem Einschalten

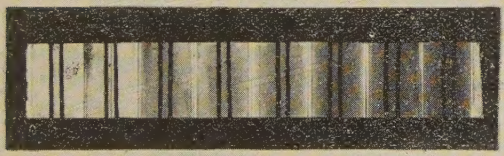
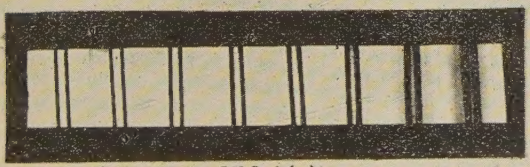


Abb. 28



230 Volt
b nach 48 Std.

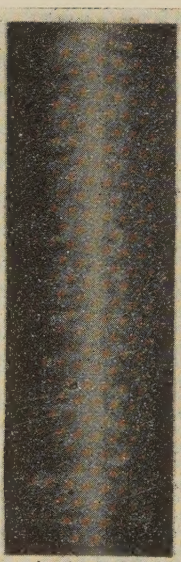
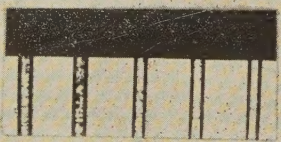


Abb. 26



115 230 345 460 575 V.
Abb. 24

115 230 345 460 575 V.
Abb. 25

Lebenslauf.

Ich wurde am 18. November 1896 in Halle a. S. als Sohn des Mittelschullehrers A. Hamel geboren. Meine Schulbildung beendete ich auf der Oberrealschule Eisleben. Während des Krieges stand ich an der Front des westlichen Kriegsschauplatzes. Nach dem Kriege absolvierte ich das Polytechnikum in Cöthen i. Anh. und war hierauf einige Jahre im Sachsenwerk Radeburg als Ingenieur tätig. Ich widmete mich dann an der Universität Halle a. S. dem Studium und der Vollendung der vorliegenden Arbeit.

Martin Hamel.